



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

**ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE**

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

**TESTOVÁNÍ NÁSTROJŮ PRO VÍCEOSÉ FRÉZOVÁNÍ NA  
OBRÁBĚCÍCH CENTRECH**

TESTING OF CUTTING TOOLS FOR MULTI-AXIS MACHINING AT MACHINING CENTRES

**DIZERTAČNÍ PRÁCE**

DOCTORAL THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**Ing. Jan Dvořáček**

**ŠKOLITEL**

SUPERVISOR

**prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.**

**BRNO 2016**



## **Abstrakt**

Disertační práce je zaměřena na testování nástrojů pro obrábění na pětiosých obráběcích centrech a možností využití metod plánovaného experimentu v této oblasti. V teoretické části je zaměřena pozornost zejména na rozbor specifických oblastí při obrábění nástroji pro víceosé obrábění, včetně analýzy průřezu třísky a specifika testování nástrojů pro vysokorychlostní obrábění s uvažováním problematiky stability řezných nástrojů. Dále je v práci diskutováno silové zatížení řezných nástrojů včetně způsobů měření, pozorované změny zatížení v průběhu rozvoje opotřebení a rozbor analýzy dat. V práci je také obsažen popis plánovaného experimentování a uvažované způsoby jeho využití v oblasti testování řezných nástrojů. Všechny teoretické předpoklady jsou ověřovány v praktické části na počtu rozsáhlých experimentálních zkoušek, zahrnujících mimo jiné hodnocení stavu nástrojů, analýzu vlivu povlaků na řezivost nástroje. Pro jednotlivé podmínky testování jsou vytvořeny specifické metodiky zpracování datových souborů a hodnocení řezivosti testovaných nástrojů. Získané výsledky byly zpracovávány pomocí statistických metod a vyhodnocovány dle metod plánovaného experimentování. V práci je rovněž obsaženo množství analýz opotřebení nástrojů, dokumentovaných pomocí světelné i elektronové mikroskopie.

## **Klíčová slova**

testování nástrojů, plánovaný experiment, těžkoobrobitelné materiály, analýza silového zatížení, statistická analýza, opotřebení nástroje, empirický model.

## **Abstract**

The thesis is focused on testing of the cutting tools for machining on five axis machine tools and possibility of implementation of designed experiments in this area. The theoretical section focuses attention on analysis of specific features during five axis machining, including chip cross section and particularity of tool testing under high speed cutting conditions with consideration of dynamic stability of cutting tools. In the thesis force loading of the tool is discussed as well as its measurement process, considering force development caused by tool wear and data analysis. Description of designed experiment and its application to the area of tool testing is included as well. All theoretical predictions are followed by experimental verifying by extensive number of experimental tests, including evaluation of cutting tool condition, influence of hard coatings on cutting power of the tools, etc. For each of testing conditions are designed specific methods of processing of gathered data as well as evaluation of power of the cutting tools. Gathered data were processed by means of statistical evaluation and by statistical methods of designed experiments. The thesis contains also the extensive number of records and analysis, documented by means of light microscopy as well as electron microscopy.

## **Keywords**

tool testing, designed experiments, hard to machine materials, force loading analysis, statistical analysis, tool wear, empirical model.

DVOŘÁČEK, J. *Testování nástrojů pro víceosé obrábění na obráběcích centrech*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016. 127 s. Vedoucí disertační práce prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.

Prohlašuji, že jsem disertační práci na téma Testování nástrojů pro víceosé obrábění na obráběcích centrech vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Ing. Jan Dvořáček



Děkuji tímto mému školiteli prof. Ing. Miroslavu Píškovi CSc. za cenné připomínky a rady při vypracování disertační práce, za vedení a veškerou podporu poskytnutou v průběhu celého studia. V neposlední řadě děkuji svým rodičům, manželce, celé své rodině a také kolegům a blízkým za jejich trpělivost a zejména za poskytnutou psychickou podporu v průběhu postgraduálního studia.

Ing. Jan Dvořáček





# Obsah

<b>Obsah</b>	<b>8</b>
<b>Úvod do problematiky</b>	<b>9</b>
<b>Cíle disertační práce</b>	<b>11</b>
<b>1 Rozbor současného stavu problematiky</b>	<b>13</b>
1.1 Charakteristika technologie frézování	14
1.1.1 Kinematika frézování	14
1.1.2 Analýza průřezu třísky	15
1.2 Obráběcí centra a nástroje pro víceosá obráběcí centra	16
1.2.1 Specifické znaky frézování tvarovými nástroji	17
1.2.2 Negativní jevy a jejich řešení	19
1.3 Specifika testování nástrojů pro vysokorychlostní obrábění	21
1.4 Stabilita řezných nástrojů	24
1.5 Silové zatížení při frézování	26
1.5.1 Rozvoj silového zatížení při frézování v průběhu opotřebení	26
1.5.2 Metody měření silového zatížení při obrábění	28
1.5.3 Data silových záznamů a jejich analýza	30
1.6 Charakteristika experimentálních zkoušek	31
1.6.1 Krátkodobé zkoušky	31
1.6.2 Dlouhodobé zkoušky	32
1.7 Hodnocení stavu opotřebení nástrojů	32
1.7.1 Měření opotřebení, kriteria	33
1.7.2 Moderní možnosti hodnocení stavu opotřebení nástrojů	34
<b>2 Plánování experimentu v oblasti testování řezných nástrojů</b>	<b>35</b>
2.1 Znaky plánovaného experimentu	35
2.2 Principy plánování experimentu a typy plánů	36
2.2.1 Faktorové experimenty s jedním faktorem	36
2.2.2 Faktorové experimenty	37
2.2.3 Response surface design experimenty	38
2.3 Zpracování naměřených dat a jejich analýza	39
2.3.1 Test adekvátnosti modelu	39
2.3.2 Významnost koeficientů	40
<b>3 Testování nástrojů pro specifické podmínky obrábění</b>	<b>41</b>
3.1 Experimentální zkoušky, metodika měření a jejich charakteristika	41
3.2 Testování nástroje pro rovinné HSC obrábění Al slitiny	43

3.2.1	Cíl experimentu . . . . .	43
3.2.2	Popis experimentu . . . . .	44
3.2.3	Způsob snímání zatížení nástroje, metodika měření . . . . .	46
3.2.4	Příprava experimentu . . . . .	51
3.2.5	Analýza naměřených experimentálních dat . . . . .	52
3.2.6	Rozbor opotřebení nástrojů . . . . .	64
3.2.7	Díličí závěry a doporučení . . . . .	67
3.2.8	Měření odklonu a návrh změny geometrie lůžka frézovací hlavy . . .	69
3.2.9	Analýza naměřených dat - upravená geometrie lůžka frézovací hlavy	69
3.2.10	Empirický model . . . . .	76
3.3	Testování frézovacích nástrojů pro souvislé víceosé obrábění . . . . .	81
3.3.1	Cíl experimentu . . . . .	81
3.3.2	Popis experimentu a použitého vybavení . . . . .	81
3.3.3	Výběr faktorů a stanovení úrovní faktorů . . . . .	84
3.3.4	Volba odezvy . . . . .	85
3.3.5	Plán experimentu . . . . .	86
3.3.6	Realizace experimentu . . . . .	86
3.3.7	Statistická interpretace výsledků . . . . .	86
3.4	Testování nástroje s VBD pro aplikaci obrábění HSS oceli . . . . .	92
3.4.1	Cíl experimentu . . . . .	92
3.4.2	Popis experimentu . . . . .	92
3.4.3	Výběr faktorů a úrovní . . . . .	96
3.4.4	Volba odezvy . . . . .	96
3.4.5	Plán experimentu . . . . .	97
3.4.6	Statistická interpretace výsledků . . . . .	97
3.4.7	Zhodnocení a diskuse dosažených výsledků . . . . .	102
<b>4</b>	<b>Závěry</b>	<b>107</b>
	<b>Perpektiva dalších prací</b>	<b>111</b>
	<b>Literatura</b>	<b>113</b>
	<b>Publikace autora</b>	<b>119</b>
	<b>Seznam použitých zkratk a symbolů</b>	<b>121</b>
	<b>Seznam příloh</b>	<b>127</b>

# Úvod do problematiky

Obrábění je jednou z nejčastěji používaných metod technologie [1]. S postupnou implementací NC a CNC strojů do strojírenské výroby v posledních desetiletích, docházelo k postupnému snižování výrobních časů, zvyšování reprodukovatelnosti výroby a možnosti alokace výroby součástí komplexních tvarů na jedno pracoviště. Na základě snahy o slučování jednotlivých technologických obráběcích operací postupně vznikala tzv. obráběcí centra, která se postupem let vyvinula ve stroje s vysokou tuhostí, umožňující z velké části nebo zcela obrobit různé tvarově složité součásti při jednom upnutí. Důsledkem toho je možné produkovat součásti komplexních tvarů, jednak za zlomek času, ve kterém bylo možné vyrobít součásti takového charakteru na konvenčních strojích, ale také významných úspor v oblasti výrobních přípravků a nutnosti použití speciálních nástrojů. Se strmým nárůstem výkonu výpočetní techniky během posledních 15-ti let a možnostmi které nabízí, byl zaznamenán i rozvoj řídicích systémů obráběcích strojů a s tím spojených možností samotných CNC strojů[2].

Obecnou snahou je alokace výroby součástí komplexních tvarů na jeden stroj, na kterém je možno provádět různé druhy technologických operací. Tyto stroje jsou označovány jako obráběcí centra. Marek [3] ve své publikaci definuje jednovřetenové obráběcí centrum: „*OC je takový stroj, který může provádět různé druhy technologických operací, pracuje v automatickém cyklu, je vybaven automatickou výměnnou nástrojů a obrobků a má možnost víceosého vysokorychlostního obrábění.*“ OC je strojem zajišťujícím vysokou tuhost a současně vytvářejícím podmínky pro pohyb s co největším počtem stupňů volnosti, aby bylo možné obrobit součásti komplexních tvarů na jedno upnutí. Požadavky na stroje typu OC kladou nemalé nároky na nástrojové vybavení. Pro využití možností OC je tedy nezbytné použití moderních, dostatečně přesných prostředků, vstupujících do procesu obrábění, tj. nástrojů a jejich upínačů, moderních způsobů upínání obrobků, moderních CAM systémů a mnoha dalších, s tím souvisejících[3].

Řezné nástroje tedy představují jedny z prostředků vstupujících do procesu obrábění a svými vlastnostmi ovlivňují podstatně charakteristiky výstupu a současně ekonomičnost procesu obrábění. Testování řezných nástrojů je obvyklou metodou zjišťování chování nástrojů a jejich vhodnosti pro dané aplikace během procesu obrábění. Tato metoda je s úspěchem používána v technologii obrábění, ve své podstatě již od počátků lidstva (povážíme-li, že již pravěcí lidé využívali „obrábění“ a prováděli primitivní „testy“ při broušení pazourků a dalších, prostým zkoušením, který materiál dostupný v jejich okolí jim umožňuje vyrobít si potřebný tvar rychleji, efektivněji). V současné době existuje nepřeberné množství elektrických, elektronických a mechanických zařízení umožňující měření zavedených veličin, fyzikálních, technologických a dalších. Testování řezných nástrojů se postupem času vyvinulo v komplexní proces využívající moderních zařízení, založený na znalostech fyziky, matematiky, elektrotechniky, při současné aplikaci statistiky[4–7].

Je tedy nasnadě provádění testů nástrojů používaných pro obráběcí centra s možností souvislého řízení více os. Tyto nástroje by měly být schopny odolávat zatížení ve více osách, tj. mít dostatečnou tuhost, aby byly schopné odolávat deformaci v průběhu obrábění a tímto způsobem ovlivňovat výslednou přesnost, a současně by měli mít odolnost proti opotřebení z důvodu zajištění vysoké trvanlivosti nástrojů. Na obráběcích centrech se využívají nástroje umožňující obrábění tvarových ploch vnějších i vnitřních a různých tvarových prvků. V posledních letech dochází k implementaci obrábění vysokými rychlostmi, tzv. high speed cutting (dále HSC), high feed cutting (dále HFC), high productive cutting (dále HPC) obrábění do průmyslového odvětví, které klade vysoké nároky na obráběcí stroje, a současně i na řezné nástroje. Nejčastěji využívanými nástroji pro obráběcí centra jsou v dnešní době tvarové nástroje vyrobené ze slinutého karbidu, opatřeného povlaky nanesenými technologiemi PVD na bázi AlTiN[7–11].

# Cíle disertační práce

Cílem disertační práce je testování nástrojů pro víceosá obráběcí centra - testování nástrojů určených pro obrábění hliníkových slitin s obsahem křemíku vyšším než osm procent a testování nástrojů s VBD pro obrábění HSS ocelí. Dílčím cílem autora je aplikace a implementace metod plánovaného experimentu v technologii obrábění pro testování řezných nástrojů. K testování nástrojů budou použity prostředky dostupné na Ústavu strojírenské technologie na FSI VUT v Brně, zejména strojní vybavení (obráběcí centrum TAJMAC-ZPS MCV 1210, popř. frézka FV 25CNC), aparatura pro měření silového zatížení KISTLER (dynamometr, specializovaný software Dynoware). Budou taktéž zaznamenávány stavy břitů nástrojů před, v průběhu a po dokončení experimentálních měření pomocí mikroskopu pro dokumentaci a vyhodnocení opotřebení břitů. Rovněž bude využíván software pro zpracování datových souborů se záznamy silového zatížení (Matlab) a bude vytvořen s tím související specializovaný skript pro zpracování velmi rozsáhlých datových souborů, a dále bude využíván software pro statistické zpracování a plánování experimentů (Matlab, Minitab, Statistica). V současné době jsou prováděny testy nástrojů pro různé výrobce. Po dohodě s výrobcí nástrojů budou výsledky zveřejněny v rámci disertační práce či budou poskytnuty nástroje další pro provedení následných testů. Současně probíhá spolupráce s firmami zabývajícími se povlakováním a testování různých druhů povlaků, přičemž je touto cestou spolupracováno i na vývoji povlaků.

Kompletní proces testování se bude skládat z následujících kroků:

1. sestavení plánu experimentu a selekce hlavních ovlivňujících technologických parametrů,
2. selekce nástrojů a jednotlivých povlaků,
3. analýza substrátu a deponovaných vrstev,
4. analýza geometrie, mikrogeometrie vybraných nástrojů,
5. dokumentace počátečního stavu břitu nástrojů,
6. provedení experimentálních zkoušek v podmínkách reálného obrábění a současně měření progresu silového zatížení v průběhu zkoušek,
7. vyhodnocení vybraných parametrů drsnosti povrchu,
8. analýza průřezu a stavu třísek,
9. vyhodnocení dat získaných pomocí experimentálního měření,
10. statistické zpracování, posouzení interakcí, určení hlavních ovlivňujících technologických parametrů,
11. formulace závěrů a doporučení pro výrobce.



# 1. Rozbor současného stavu problematiky

Mezi významnou a velmi komplexní oblast strojírenství se řadí výroba řezných nástrojů. Řezné nástroje jsou aktivními prvky podílející se významně jednak na kvalitě vyráběných součástí a rovněž i na ekonomičnosti výroby[12]. Vlastnosti řezných nástrojů používaných pro strojní obrábění jsou pevně spjaty s řeznými materiály použitými pro jejich výrobu, přičemž je možné do jisté míry ovlivňovat řezivost daného nástroje různými úpravami geometrie nástroje[13]. V současné době jsou nástroje specializované pro obrábění konkrétních druhů obráběných materiálů (např. určení aplikačních oblastí slitutých karbidů dle ISO 513). Mezi požadavky kladené na řezné nástroje patří zejména tvrdost za vysokých teplot, pevnost v ohybu, otěruvzdornost a odolnost vůči opotřebení. Mezi další požadavky na řezné nástroje je možné zařadit jejich tuhost – schopnost odolávat silovému zatížení při současném tepelném namáhání, která patří mezi faktory ovlivňující výsledné kvalitativní i kvantitativní parametry vyráběných povrchů[8, 14]. Současný výzkum v oblasti řezných nástrojů se nezaměřuje primárně na objevení nových řezných materiálů, spíše je zaměřen na vývoj materiálů stávajících – např. zvyšování kvality substrátů, zmenšováním karbidických částic atd[15, 16].

Obráběcí centra jsou stroje, které jsou používány obvykle využívány k výrobě tvarově složitých součástí, např. formy, zápustky a další tvarové součásti. Velmi často jsou tyto součástky již v tepelně zpracovaném stavu, což je činí podstatně hůře obrobitelnými. K výrobě obecných tvarových ploch jsou využívány frézovací nástroje s kulovým čelem, půlkruhovými čelními břity, toroidní frézy, v provedeních monolitních či v provedení s VBD. Tyto nástroje jsou vhodné jak pro hrubování, tak i pro dokončování vzhledem ke tvaru jejich břitu. Obráběcí proces je doprovázen silovým zatížením, které způsobuje vibrace a rozměrové chyby. Ostré hrany působí jako koncentrátoři napětí i u řezných nástrojů, což bylo prokázáno mnoha výzkumnými týmy[7, 17].

V současné době se zabývá výzkumem v dané oblasti mnoho výzkumných týmů po celém světě, od problematiky popisu geometrie tvarových nástrojů zahrnující tvorbu výpočetních modelů zatížení nástroje bez uvažování opotřebení řezných nástrojů [4, 6, 18] nebo včetně [19], analýzou tvorby třísky, analýzou průřezu třísky [8–10, 12, 14] a mnoha dalších. López de Laccalle, Lamikiz [7] se zabývali záznamem silového zatížení a určením závislosti mezi nárůstem silového zatížení a vznikem rozměrových chyb obrobeného povrchu při obrábění součásti typu forma. U nástrojů s kulovým čelem dochází k negativnímu jevu vyplývajícím z nulové velikosti řezné rychlosti v ose nástroje a v důsledku toho zhoršení kvality obrobeného povrchu a předčasného opotřebení nástroje [20]. Fontaine, Devillez, Moufki a Dudzinski vyvinuli model pro predikci řezných sil s vykloněním nástroje/obrobku [18, 21]. Důležitost je třeba přikládat i stavu povrchové vrstvy po obrábění – integritě povrchu. Při HSC frézování kalených materiálů nástroji ze SK bylo dosaženo

## 1.1. CHARAKTERISTIKA TECHNOLOGIE FRÉZOVÁNÍ

drsnosti povrchu v rozsahu - Korkut [22] uvádí pro ocel AISI 1020 (Ra 0,7 – 1,6) a ocel AISI 1040 (Ra 0,8 – 2,5  $\mu\text{m}$ ), dle článku Koshy [23] pro ocel AISI D2 - 58HRC (Ra 1 – 6  $\mu\text{m}$ ).

Popis geometrie tvarového nástroje je důležitý při určování měrné energie obrábění, měrné řezné síly atd. Při testování nástrojů pro obráběcí centra je využíváno výsledků výzkumných týmů, zkušeností z různých oblastí problematiky tvarových nástrojů. Oblast frézování tvarovými nástroji není stále zcela prozkoumána.

Testování řezných nástrojů se skládá ze zkoumání morfologie, hledání slabých míst substrátů a povlaků, chyb způsobených ostřením nástrojů a je ve své podstatě posledním článkem vývoje řezných nástrojů, vývoje povlaků. Napomáhá také specifikovat aplikační oblasti a rozsahy řezných podmínek pro dané nástroje/povlaky, přičemž dávají určitou reflexi výroci nástroje/povlaku o slabých místech v jeho výrobě. Toto je zvláště cenným přínosem v dnešním „otevřeném“ celosvětovém trhu a konkurenci, která je v tomto odvětví mohutná.

## 1.1. Charakteristika technologie frézování

### 1.1.1. Kinematika frézování

Hlavní pohyb při frézování je vykonáván řezným nástrojem - frézou a je definován řeznou rychlostí  $v_c[\text{m} \cdot \text{min}^{-1}]$ , která je vyjádřena vztahem ve tvaru:

$$v_c = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{10^3}. \quad (1.1)$$

Vedlejší pohyb  $v_f [\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}]$  je vykonáván v závislosti na uspořádání a konstrukci stroje, buď obrobkem či obrobkem a řezným nástrojem, přičemž obecně závisí na druhu frézy, na hodnotě posuvu na zub  $f_z$  a počtu zubů frézy  $z$  a je vyjádřen ve tvaru:

$$v_f = \frac{f_z \cdot z \cdot n}{10^3}. \quad (1.2)$$

Kinematika frézování pro stopkový nástroj s kulovým čelem je znázorněna na obr. 1.1, kde je naznačeno rovněž vektorové skládání hlavních a vedlejších pohybů.

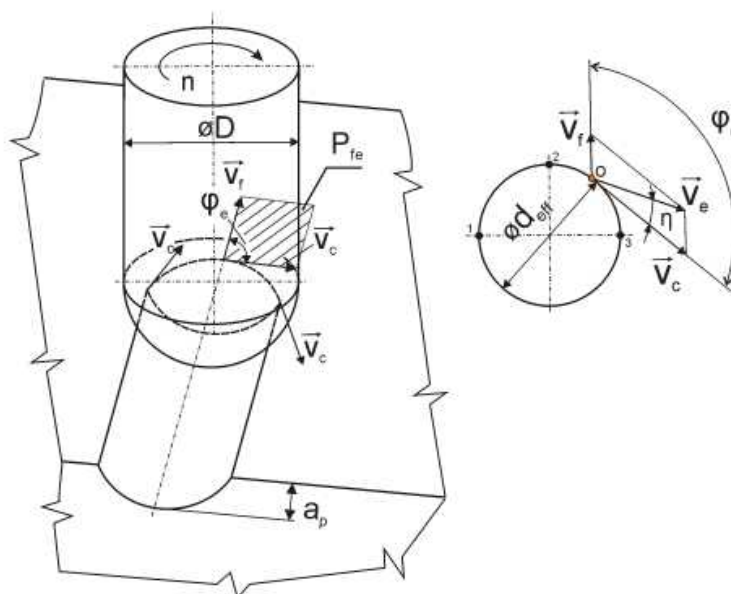
Celkový pohyb  $v_e$  je pak dán vektorovým součtem hlavního a vedlejšího pohybu a ve vektorovém tvaru je vyjádřen pomocí vztahu:

$$\vec{v}_e = \vec{v}_c + \vec{v}_f \quad (1.3)$$

, přičemž velikost může být vyjádřena dle vztahu:

$$|v_e| = \sqrt{v_c^2 + v_f^2 - 2 \cdot v_c \cdot v_f \cdot \cos(180 - \varphi_e)} \quad (1.4)$$





Obrázek 1.1: Kinematika frézování.

### 1.1.2. Analýza průřezu třísky

Mezi základní znaky frézování patří periodicky přerušovaný řez, proměnná tloušťka třísky a používání vícebřitých nástrojů. S tloušťkou třísky úzce souvisí i průřez třísky, který je možné určit v závislosti na použitém typu nástroje a druhu frézování. Plocha průřezu třísky se mění v závislosti na aktuálním úhlu záběru a společně s touto časovou změnou dochází ke změně měrné řezné síly, celkového zatížení zubu frézy i řezného výkonu.

#### Průřez třísky při čelním frézování

Průřez třísky při čelním frézování je ovlivňován jmenovitou tloušťkou a jmenovitou šířkou třísky. Jmenovitá tloušťka třísky při čelním frézování se mění v závislosti na posuvu na zub  $f_z$ , úhlu nastavení hlavního ostří  $\kappa_r$ , ale také v závislosti na úhlu posuvového pohybu  $\varphi_i$ . V libovolné fázi je možné určit její okamžitou hodnotu na základě vztahu:

$$h_{Di} = f_z \cdot \sin \kappa_r \cdot \sin \varphi_i \quad (1.5)$$

Jmenovitá šířka třísky je konstantní a je ji možné určit na základě vztahu:

$$b_{Di} = \frac{a_p}{\sin \kappa_r} \quad (1.6)$$

, kde  $a_p$  je šířka záběru ostří a  $\kappa_r$  je úhel nastavení hlavního ostří.

Průřez třísky při čelním frézování je tedy možné určit na základě vztahu:

$$A_{Di} = h_{Di} \cdot b_{Di} \quad (1.7)$$

## 1.2. OBRÁBĚCÍ CENTRA A NÁSTROJE PRO VÍCEOSÁ OBRÁBĚCÍ CENTRA

### Průřez třísky při válcovém frézování

Průřez třísky při válcovém frézování je ovlivňován jmenovitou tloušťkou a jmenovitou šířkou třísky jako u čelního frézování, ale úhel posuvového pohybu se mění nejen v závislosti na aktuální poloze řešeného zubu, ale u nástrojů se šikmými zuby nebo se zuby ve šroubovici i podél ostří. Průřez třísky je možné určit např. na základě tohoto vztahu:

$$A_D = f_z \cdot \sqrt{R^2 + \left(\frac{s_s}{2\pi}\right)^2 \cdot \sum_{i=1}^{z_z} (\cos\varphi_{1i} - \cos\varphi_{2i})} \quad (1.8)$$

, kde  $z_z$  je počet zubů v záběru,  $R$  je poloměr nástroje,  $s_s$  je stoupání šroubovice. Celé odvození vztahu je možné najít v literatuře [16].

## 1.2. Obráběcí centra a nástroje pro víceosá obráběcí centra

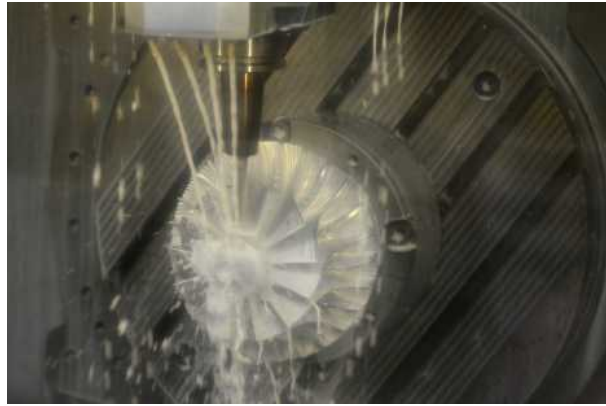
Obráběcí centra patří do kategorie obráběcích strojů, pro kterou jsou charakteristické vlastnosti jako možnost souvislého řízení jednotlivých os stroje a s tím související možnost provádění různých druhů technologických operací, práce v automatickém cyklu, automatická výměna nástrojů popřípadě i možnost automatické výměny nástrojů a má možnost vysokorychlostního obrábění[3]. Stroje tohoto typu mohou při splnění určitých podmínek pracovat i v bezobslužném provozu.

Název obráběcí centrum se ustálil ze snahy o efektivní racionalizaci malo- a středně-sériové výroby a v širokém měřítku se tato koncepce prosazuje ve výrobním programu všech předních světových výrobců od počátku šedesátých let. Hlavním důvodem vzniku tohoto typu strojů byla tedy snaha alokace výroby složitých součástí na co nejmenší počet pracovišť, výrobitelných na jedno či několik upnutí na jednom stroji[3].

Obráběcí centra určená pro obrábění nerotačních součástí mají minimálně tři lineárně řízené osy, které jsou podle podmínek využití doplňovány dalšími rotačními případně translačními pohyby. Taková konfigurace stroje potom zabezpečuje možnost obrábění tvarově složitých součástí viz obr. 1.2 [3, 24].

Součásti obráběné pomocí obráběcích center jsou jak rotační, tak i nerotační dílce různého charakteru, z rozličných materiálů, v závislosti na velikosti obráběcího centra. Shodným parametrem těchto součástí je pak nutnost vytvoření komplexních tvarů za pomoci tvarově jednoduchých nástrojů. K tomu je nezbytné využití co největšího počtu stupňů volnosti obráběcího stroje. Tato kritéria splňují právě obráběcí centra.

Obráběcí nástroje využívané pro frézování na obráběcích centrech představují širokou plejádu nástrojů, a to jak hrubovacích, tak i dokončovacích, monolitních nebo s výměnitelnými břitovými destičkami. Jedná se o nástroje pro rovinné i tvarové frézování, frézování kapes, vybrání a v neposlední řadě i nástroje vrtací, nástroje pro frézování závitů atd. V sortimentu tuzemských i světových výrobců rezných nástrojů je možné nalézt ná-



Obrázek 1.2: Typický příklad souvislého obrábění v pěti osách. Obrábění kompresorového kola.

stroje různých provedení, z různých nástrojových materiálů (ať už HSS, SK, CNB, PKD, atd.), jejichž výkonnost a trvanlivost je dána už nejen geometrií nástroje a nástrojovým materiálem. Současně je ovlivňována i kvalitou a typem nástrojových povlaků nanášených různými technikami (známými pod zkratkami jako CVD, PVD, MTCVD, PA-CVD, PLD ad.), které nemusí obsahovat pojivo a vzájemně se mohou se lišit chemicky, stechiometricky, strukturou, tribologickými vlastnostmi atd. Současně v posledních letech nabývají na významu i nástroje pro HSP, HFC či HPC. Velmi často jsou na OC využívány tvarové nástroje, u kterých se během obrábění projevují jisté specifické znaky.

### 1.2.1. Specifické znaky frézování tvarovými nástroji

Charakteristickými znaky frézování jsou přerušovaný řez, proměnná tloušťka vznikající třísky a použití vícebřitých nástrojů [10, 16]. Díky uvedeným skutečnostem má řezná síla proměnnou hodnotu a hodnota řezné síly je vztahována k hodnotě průměrného průřezu třísky. V závislosti na strategii frézování je zapojen odpovídající počet zubů. Počet zubů v záběru může být určen dle vztahu [10]:

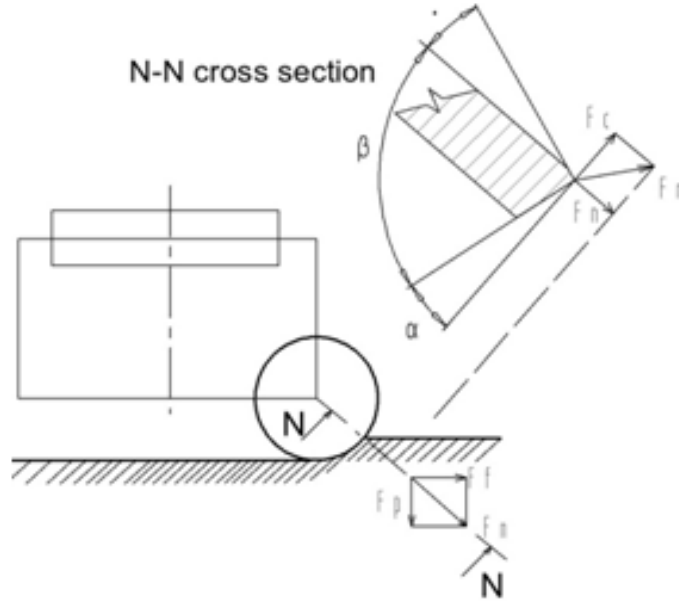
$$n_z = \frac{2 \cdot z \cdot \arcsin\left(\frac{B}{D}\right)}{360^\circ} \quad (1.9)$$

Nástroje s VBD jsou používány nejčastěji pro hrubování nebo pro frézování tvarových ploch [6, 22, 23]. Výsledné silové zatížení na břitu nástroje ( $F$ ) je možné rozložit např. do složek: řezná síla ( $F_c$ ), kolmá řezná síla ( $F_{cn}$ ) a pasivní síla ( $F_p$ ). Tyto síly jsou znázorněny na obr. 1.3.

Fréza s VBD kruhového tvaru má ve srovnání s běžnými frézami několik základních rozdílů. Nejpodstatnějším je proměnná velikost řezné rychlosti na ostří nástroje [5, 8]. Řezná síla  $F_c$  (Obr. 3.1) závisí na průřezu třísky  $A_D$  a měrné řezné síle obráběného materiálu  $k_c$  [10]:

$$F_c = A_D \cdot k_{ci} \quad (1.10)$$

## 1.2. OBRÁBĚCÍ CENTRA A NÁSTROJE PRO VÍCEOSÁ OBRÁBĚCÍ CENTRA



Obrázek 1.3: Složky silového zatížení při čelním frézování nástrojem v VBD kruhového tvaru [22].

Dle [25] je možné formulovat parametricky maximální průřez třísky  $A_{Dmax}$  (pro maximální zatížení), jako:

$$A_{Dmax} = \int_{\alpha}^{\beta} h_{max} \cdot \sin(t) \cdot T(t) dt \quad (1.11)$$

odpovídající nejvyšší síle pro  $h_{max}$ , jako funkci úhlů  $\varphi$  and  $\Psi$  ve dvou kolmých rovinách:

$$h_{max} = f_z \cdot \sin(\varphi_{max}) \cdot \sin(\psi_{max}), \quad (1.12)$$

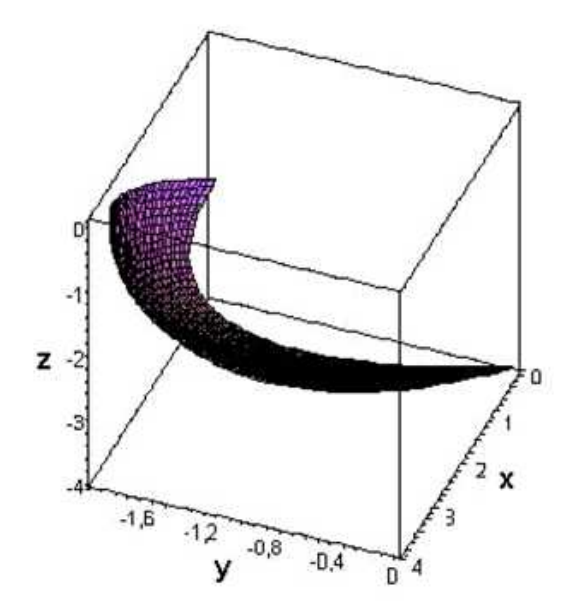
přičemž kvadrát parametru  $T$  může být vyjádřen ve formě:

$$T^2(t) = \left( \frac{R}{9} \cdot \sin\left(\frac{1}{9} \cdot t\right) \cdot \sin(t) - R \cdot \cos\left(\frac{1}{9} \cdot t\right) \cdot \cos(t) \right)^2 + \left( \frac{R}{9} \cdot \cos\left(\frac{1}{9} \cdot t\right) \cdot \sin(t) + R \cdot \sin\left(\frac{1}{9} \cdot t\right) \cdot \cos(t) \right)^2 + 64 \cdot \sin^2(t)$$

Měrná řezná síla  $k_c$  je závislá na obráběném materiálu, šířce záběru ostří  $h$  a na řezné rychlosti  $v_c$  a může být zapsána jako [16]:

$$k_c = \frac{k_{c1}}{h^{mc}} \quad (1.13)$$

Složky celkového silového zatížení mohou být vyjádřeny dle normy ČSN ISO 3002, v první aproximaci jako poměry řezné síly ( $K_{Fp} < 1$ ,  $K_{Fen} < 1$ ):



Obrázek 1.4: Výpočetní model průřezu třísky pro VBD kruhového tvaru [25].

$$F_p = k_{Fp} \cdot F_c \quad F_{CN} = k_{F_{CN}} \cdot F_c \quad (1.14)$$

Silové zatížení v průběhu frézování se mění v závislosti na stavu opotřebení frézy. Tento jev je nejlépe pozorovatelný u nástrojů se zuby ve šroubovici, kdy na začátku frézování je fréza v důsledku pozitivních úhlů čela vtahována do řezu a na konci frézování (zcela opotřeбенý nástroj) se od obrobeného povrchu odtlačuje. Rozvoj opotřebení je možné nepřímo kvantifikovat pomocí dynamometrů [16].

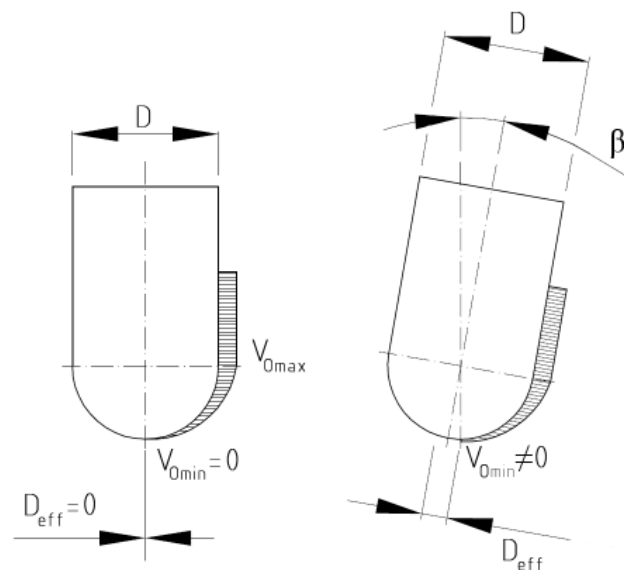
### 1.2.2. Negativní jevy a jejich řešení

Mnoho zahraničních i domácích autorů, např. [5, 6, 26], se zabývalo problematikou frézování pomocí nástrojů s kulovým čelem a možnostmi eliminace nepříznivých jevů v důsledku proměnné rezné rychlosti na čelní ploše nástroje. Při odřezávání materiálu dochází v místech přibližujících se k ose nástroje k nepříznivým jevům, jakými jsou pěchování třísky a s tím související zvyšování teploty řezání, sklon k vibracím, případně zvýšená tvorba nárůstků. Tyto jevy se projevují obzvláště nepříznivě v místech, kde velikost posuvové rychlosti přerůstá velikost rychlosti rezné a mají za následek zhoršení jakosti obráběného povrchu, snížení trvanlivosti rezného nástroje, což může vést v nejhorším případě až k jeho vyštípnutí. Tento průměr může být stanoven na základě předpokladu  $v_c \leq v_f$  a vyjádřen dle vztahu:

$$x_D = \frac{v_f}{\pi \cdot n}, \quad (1.15)$$

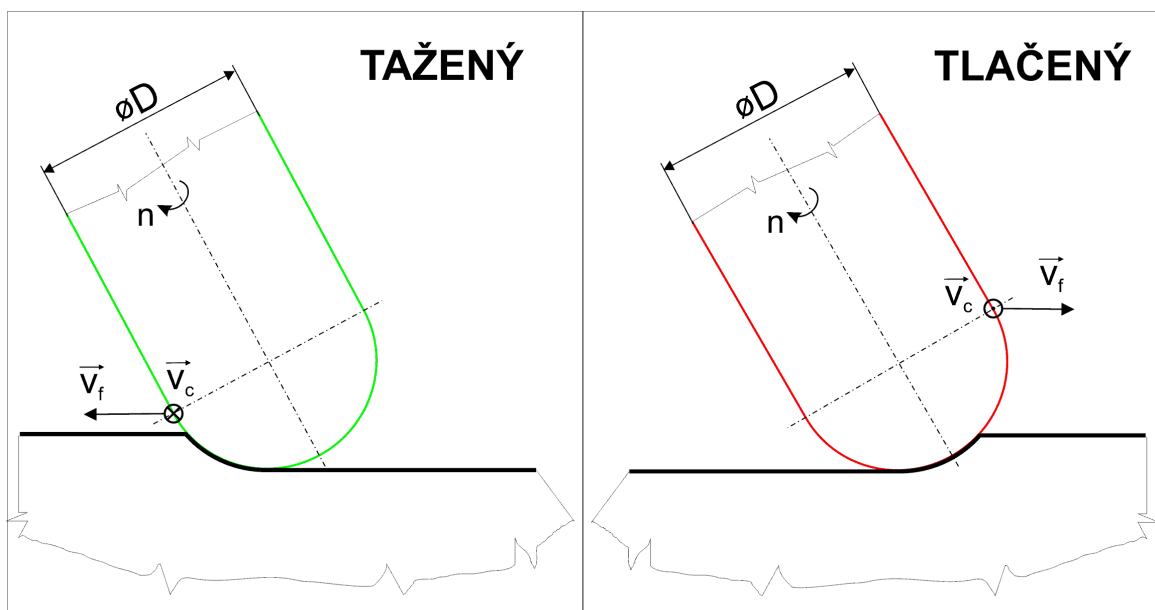
kde  $x_D$  [mm] je velikost průměru na němž je  $v_c = v_f$ ,  $v_f$  [mm.min<sup>-1</sup>] je velikost posuvové rychlosti a  $n$  [min<sup>-1</sup>] jsou otáčky.

## 1.2. OBRÁBĚCÍ CENTRA A NÁSTROJE PRO VÍCEOSÁ OBRÁBĚCÍ CENTRA



Obrázek 1.5: Schematické znázornění nevyklopeného (a) a vyklopeného (b) nástroje a znázornění efektivního průměru.

Stopkové nástroje s kulovým čelem jsou využívány zejména pro obrábění komplexních tvarových ploch na součástech typu zápustka, forma, které jsou v dnešní době velmi často obráběny v kaleném stavu, případně jsou využívány pro obrábění součástí s různými zakřivenými plochami jako jsou lopatky oběžných kol turbín či turbodmychadel. Nástroje tohoto typu jsou vhodné pro obrábění ocelí s vysokou pevností, žáruvzdorných slitin, slitin titanu, korozivzdorných slitin a v neposlední řadě i obrábění hliníkových slitin. Pro frézování kalených ocelí je vhodné využívat nástrojů ze slinutých karbidů s karbidy o velikosti zrn méně než  $1\text{ }\mu\text{m}$  v kombinaci s nástrojovými povlaky typu TiCN, případně AlTiN nanášenými pomocí metody PVD. Z uvedených oblastí nejčastějších aplikací vyplývá, že dochází v průběhu obrábění ke změně kontaktního místa v závislosti na poloze vůči obráběné ploše. Toto místo bývá označováno jako efektivní průměr frézování (viz obr. 1.5). Obvyklým způsobem, který se využívá pro eliminaci negativních jevů je vyklopení nástroje, případně obrobku. Vyklopení může být provedeno buď ve směru posuvu nebo ve směru kolmém na směr posuvu. U taženého nástroje není místo s nulovou řeznou rychlostí v kontaktu s obráběným materiálem, zatímco u nástroje tlačného se kontakt stává ještě intenzivnějším (viz obr. 1.6). Z provedených experimentů vyplynulo, že vyklopení frézovacího nástroje je výhodné pouze pro nástroj tzv. „tažený“. U nástroje tlačného dochází ještě k intenzivnějšímu kontaktu kritického místa s obráběným materiálem. Dle experimentů provedených v literatuře [26], je pro posuv na zub  $f_z=0,250\text{ mm}$  nejvhodnější vyklopení nástroje o hodnotu  $\beta_n = 15^\circ$  a pro hodnotu  $f_z = 0,250\text{ mm}$   $\beta_n = 10^\circ$ .



Obrázek 1.6: Tažený a tlačný nástroj

### 1.3. Specifika testování nástrojů pro vysokorychlostní obrábění

Vysokorychlostní obrábění (High Speed Cutting - HSC) patří mezi technologie obrábění s maximálními deformačními rychlostmi v rozsahu  $10^5$  až  $10^9$  [27]. Z velikosti maximálních deformačních rychlostí vyplývají i vysoké požadavky na stroje, nástroje a v neposlední řadě také na CNC řízení strojů. Ve srovnání s běžnými řeznými rychlostmi pro frézování pracují řezné nástroje s deformačními rychlostmi cca 5 až 10-krát vyššími, a nástroj je tak vystaven výraznějšímu působení odstředivých sil a dynamickému zatížení [27]. S rozvojem řezných nástrojů dochází k postupnému zvyšování aplikovatelnosti nástrojů ze slinutých karbidů i pro oblast HSC obrábění, a to jak kovových, tak i nekovových materiálů. V grafu na obr. 1.7 jsou znázorněny orientační hodnoty oblastí HSC obrábění pro vybrané druhy materiálů obrobku.

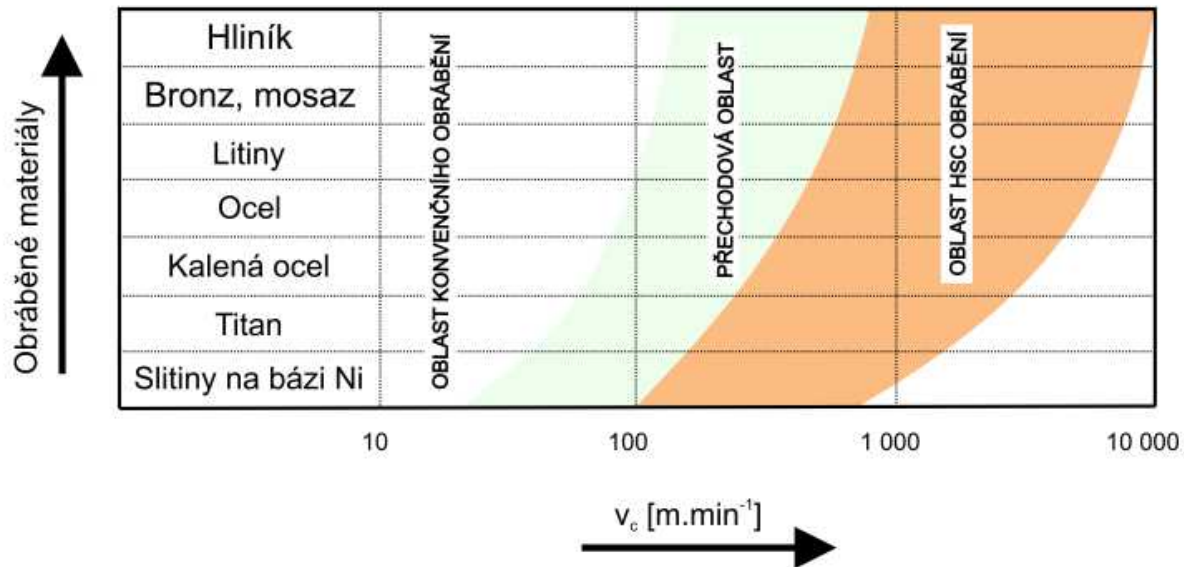
Vysokorychlostní obrábění je možné zařadit mezi velmi rychle probíhající děje. Johnson-Cook vyvinuli v 80. letech pro studium rázů a průstřelů materiálový model, vhodný pro studium vysokých rychlostí deformací a přetvoření, přičemž zpevnění materiálu je závislé na rychlosti deformace a na teplotě a řídí se dle vztahu [29]:

$$\sigma_y = [A + B (\bar{\epsilon}^p)^n] \cdot \left[ 1 + C \ln \left( \frac{\dot{\bar{\epsilon}}}{\dot{\bar{\epsilon}}_0} \right) \right] \cdot \left[ 1 - \left( \frac{T - T_{room}}{T_{melt} - T_{room}} \right)^m \right] \quad (1.16)$$

kde  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $m$ ,  $n$  jsou materiálové konstanty,  $\bar{\epsilon}^p$  je redukované plastické přetvoření,  $\dot{\bar{\epsilon}}$  je rychlost redukovaného plastického přetvoření,  $\dot{\bar{\epsilon}}_0$  je počáteční bezrozměrná rychlost redukovaného přetvoření,  $T$  je teplota materiálu,  $T_{melt}$  je teplota tavení a  $T_{room}$  je teplota tavení materiálu. Tento model je velmi často využíván právě pro simulace HSC obrábění.

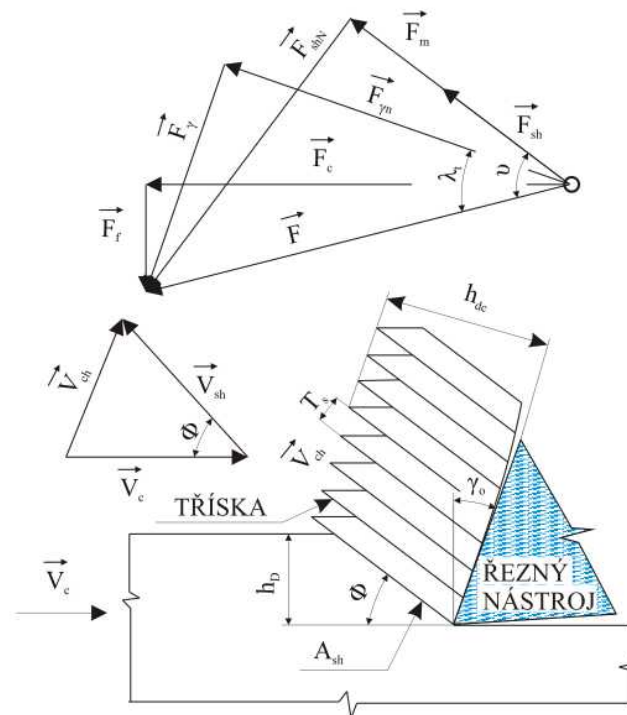


### 1.3. SPECIFIKA TESTOVÁNÍ NÁSTROJŮ PRO VYSOKORYCHLOSTNÍ OBRÁBĚNÍ



Obrázek 1.7: Orientační hodnoty oblastí HSC obrábění [28].

Pro vyjádření polohy roviny stříhu se používá energetické rovnice Merchanta (vztah 1.18). Odvození této rovnice je založeno na minimální energii nutné pro vytvoření elementu třísky a rovnosti sil ve střížné rovině, jak je znázorněno v obr. 1.8.



Obrázek 1.8: Model tvorby třísky pro HSC obrábění dle Merchanta[27].

$$F \cdot \cos v = \frac{h_D}{\sin \Phi} b_D \cdot \tau_{sh}, \quad (1.17)$$



Další úpravou je získána obecná hodnota celkové síly  $F$ :

$$F = \frac{h_D \cdot b_D \cdot \tau_{sh}}{\sin \Phi \cdot \cos \nu} \quad (1.18)$$

Směr roviny maximální hodnoty smykového napětí je dán vztahem:

$$\Phi = 45^\circ - \lambda_t + \gamma_o \quad (1.19)$$

D'Alambertova dynamická nestacionární síla  $F_m$  vyvolaná změnou hybnosti materiálu v rovině maximálních smykových napětí může být odvozena na základě rovnice:

$$F_m = \rho \cdot (v_c \cdot h_D \cdot b_D) \cdot (v_c \cdot \sin(\Phi - \gamma_o) + v_c \cdot \cos \Phi) \quad (1.20)$$

Hodnoty složek řezné síly v rovině maximálních smykových napětí jsou významné, jelikož na jejich základě je možné stanovit smluvní normálové a smykové napětí v této rovině (viz obr. 1.8):

$$\tau_{sh} = \tau_{xy} = \frac{F_{sh}}{\frac{h_D \cdot b_D}{\sin \Phi}}, \quad (1.21)$$

, kde  $A_{sh}$  je plocha roviny maximálních smykových napětí,  $h_D$  je tloušťka odebírané vrstvy a  $b_D$  je šířka odebírané vrstvy [13].

Teplota třísek při HSC obrábění se blíží teplotě tavení obráběného materiálu [30, 31]. Vlivem rychlého zvýšení teploty ve střížné rovině dochází k odpevňování materiálu a vede ke snížení normálové síly, jíž působí tříska na čelo řezného nástroje. Další pokles třecí síly i celkového řezného odporu způsobuje zvětšení úhlu smykové roviny a ztenčení průřezu třísky, což vede ke zvýšení rychlosti odchodu třísky z místa řezu [27, 30]. Rychlejší odchod třísky z místa řezu je příznivý z hlediska snížení množství přeneseného tepla do nástroje. Dochází rovněž k omezení kontaktní zóny, což má za následek snížení teploty způsobené třením v kontaktní zóně. V důsledku poklesu řezných sil a vedení tepla do nástroje i obrobku dochází ke zvýšení přesnosti obrábění. Pro HSC obrábění se využívá specifických řezných podmínek, při hrubování se zpravidla volí otáčky z oblasti maximálního výkonu, zatímco pro dokončovací operace se pracovní otáčky blíží maximálním otáčkám stroje [27]. Vybrané výhody a nevýhody HSC obrábění jsou shrnuty v tab. 1.1 .

V souvislosti s vysokorychlostním obráběním vyvstává rovněž otázka bezpečnosti a dynamické stability v procesu obrábění. Otázka stability řezných nástrojů je řešena v kapitole 1.4.

#### 1.4. STABILITA ŘEZNÝCH NÁSTROJŮ

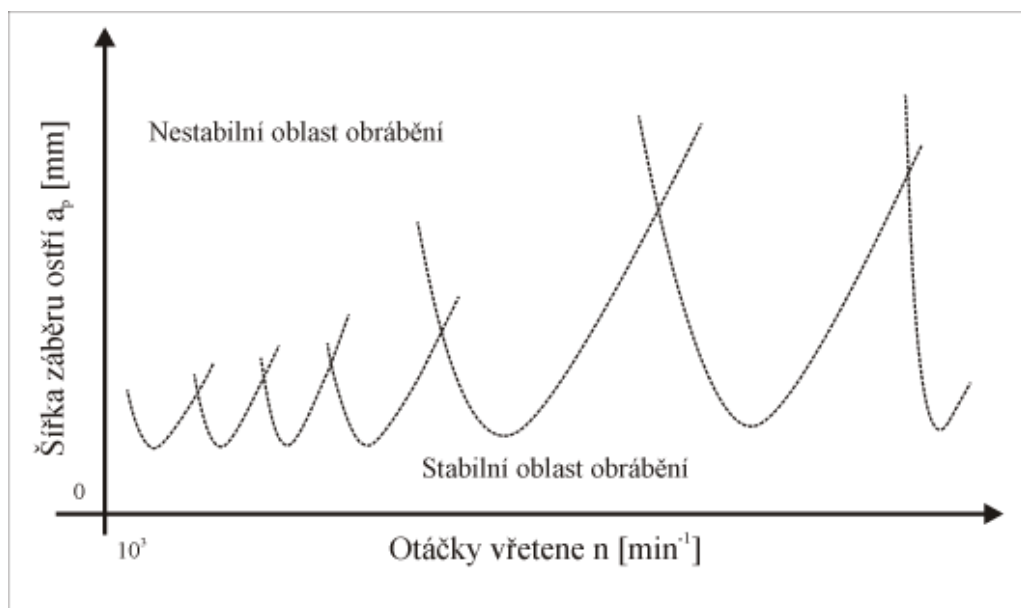
Tabulka 1.1: Vybrané výhody a nevýhody HSC obrábění [27].

VÝHODY
zvýšení objemu odebraného materiálu při hrubovacích operacích
vysoká kvalita obrobeného povrchu bez vzniku nežádoucích výrazných reziduálních tahových napětí
odvod převážné většiny tepla třískou
snížení řezné síly vlivem menšího pěchování třísky
redukce množství použité procesní kapaliny/obrábění za sucha
NEVÝHODY
vyšší investiční a provozní náklady
nákladné zajištění bezpečnosti obsluhy obráběcích center
relativní nedostatek verifikovaných technických dat pro HSC obrábění jednotlivých druhů materiálů

### 1.4. Stabilita řezných nástrojů

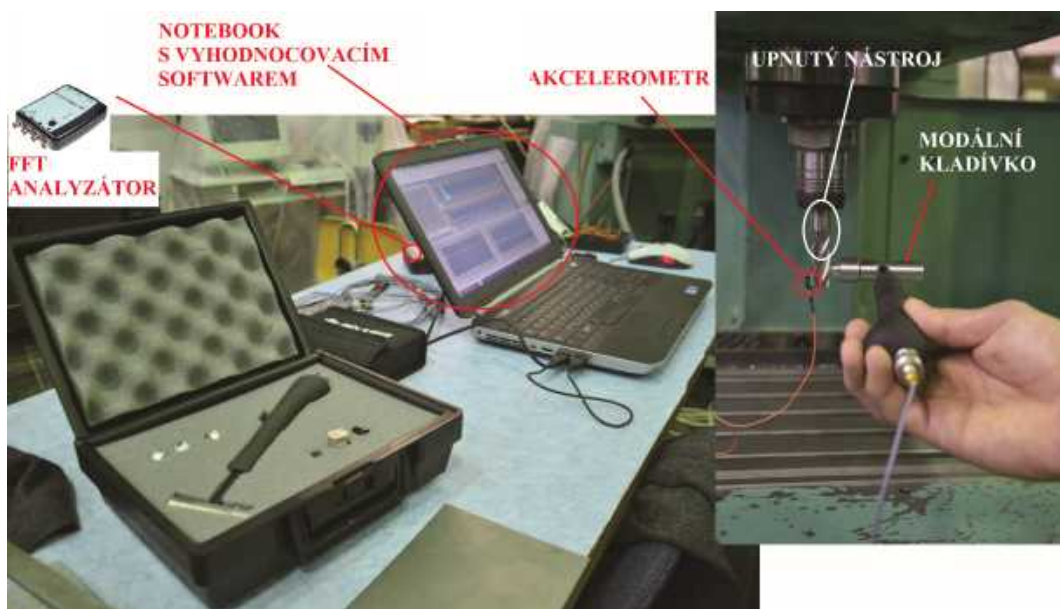
Frézovací operace mají za následek vznik různých druhů vibrací, které mohou poškodit stroj a zabránit pokračování obrábění. Chvění v průběhu obrábění patří mezi nejzákeřnější, protože má za následek zhoršení kvality obráběného povrchu, omezení trvanlivosti nástroje a jeho porušení, případně může vést až k poškození částí stroje. V oblasti vysokých řezných rychlostí nabývá na důležitosti i problematika samobuzeného kmitání v průběhu obrábění, kterému je třeba předcházet, jak je to jenom možné. [32]. Právě pro aplikaci v oblastech HSC obrábění je tato problematika velmi důležitá a patří mezi rozhodující parametry pro zajištění adekvátní trvanlivosti nástrojů. U těchto aplikací, zejména pak v oblasti technologie frézování, dochází ke vzniku samobuzeného kmitání, které se projevuje jak u hrubování, tak i dokončování.

Stabilní a nestabilní oblasti mohou být určeny na základě tzv. diagramů stability, které jsou reprezentovány pomocí mezních křivek stability tzv. „loby” (viz 1.9). Tyto křivky vyjadřují závislost šířky záběru třísky na otáčkách vřetene a sestrojením diagramu stability pomocí jednotlivých lobů vznikne diagram stability na jehož základě může být určena oblast stabilního řezného procesu. Diagram může být využitý např. pro volbu řezných podmínek, přičemž jsme schopni v diagramu vyčíst pro konkrétní šířku záběru ostří, zda je pro danou aplikaci nutné otáčky nástroje snížit či naopak zvýšit. V oblasti pod křivkami se jedná o stabilní řezný proces, zatímco v oblasti nad křivkami bude docházet v řezném procesu ke vzniku samobuzeného kmitání. Pokud při obrábění dojde k výskytu chvění, je možné využít diagram stability pro určení způsobu jakým chvění v procesu odstranit. Zda je nutné snižovat či zvyšovat otáčky, případně o kolik je potřeba snížit šířku záběru ostří. [33, 34]



Obrázek 1.9: Schematické znázornění diagramu stability [33, 34].

Tyto křivky mohou být sestavovány buď experimentálně (velká časová náročnost, vysoká cena), případně mohou být sestaveny na základě měření na konkrétním stroji s konkrétním upnutým řezným nástrojem a takto získat amplitudo-fázové frekvenční charakteristiky pomocí speciální aparatury. Aparatura (viz obr. 1.10) se sestává z modálního kladívka (v různých velikostech) a akcelerometru, které jsou napojeny na analyzátor, jenž je propojen s notebookem s vyhodnocovacím softwarem. Měření vyžaduje určitou zručnost, zvláště u nástrojů s malým průměrem.



Obrázek 1.10: Popis aparatury Bruël & Kjær pro měření FRF.

## 1.5. Silové zatížení při frézování

Silové zatížení při frézování je třeba brát jako komplexní proces zatěžování řezného nástroje v procesu obrábění. Celková působící síla v procesu obrábění, je dána součtem jednotlivých komponent zatěžujících sil. V souřadném systému dle ČSN 3002 jsou definovány složky sil - řezné ( $F_c$ ), normálové řezné ( $F_{cN}$ ) a pasivní ( $F_p$ ). Při určování velikosti řezných sil je velmi důležité správné určení průřezu třísky, který není při frézování konstantní. Rovněž může být v záběru několik zubů současně a záběr břitů je periodicky přerušovaný[16]. Při výpočtu velikosti řezných sil je vycházeno ze silových poměrů na jednom břitu, nacházejícího se v poloze určené úhlem  $\varphi_i$ .

Síla působící na  $i$ -tý zub frézy je tedy dána vztahem:

$$F_{ci} = A_{Di} \cdot k_{ci} \quad (1.22)$$

Z toho vyplývá měrná řezná síla:

$$k_{ci} = \frac{F_{ci}}{A_{Di}} \quad (1.23)$$

Následně celková řezná síla je určena vztahem:

$$F_C = \sum_{i=1}^z A_{di} \cdot k_{ci} \quad (1.24)$$

, kde  $z$  je počet zubů v současném záběru,  $A_{di}$  je průřez třísky na  $i$ -tém zubu a  $k_{ci}$  je měrná řezná síla.

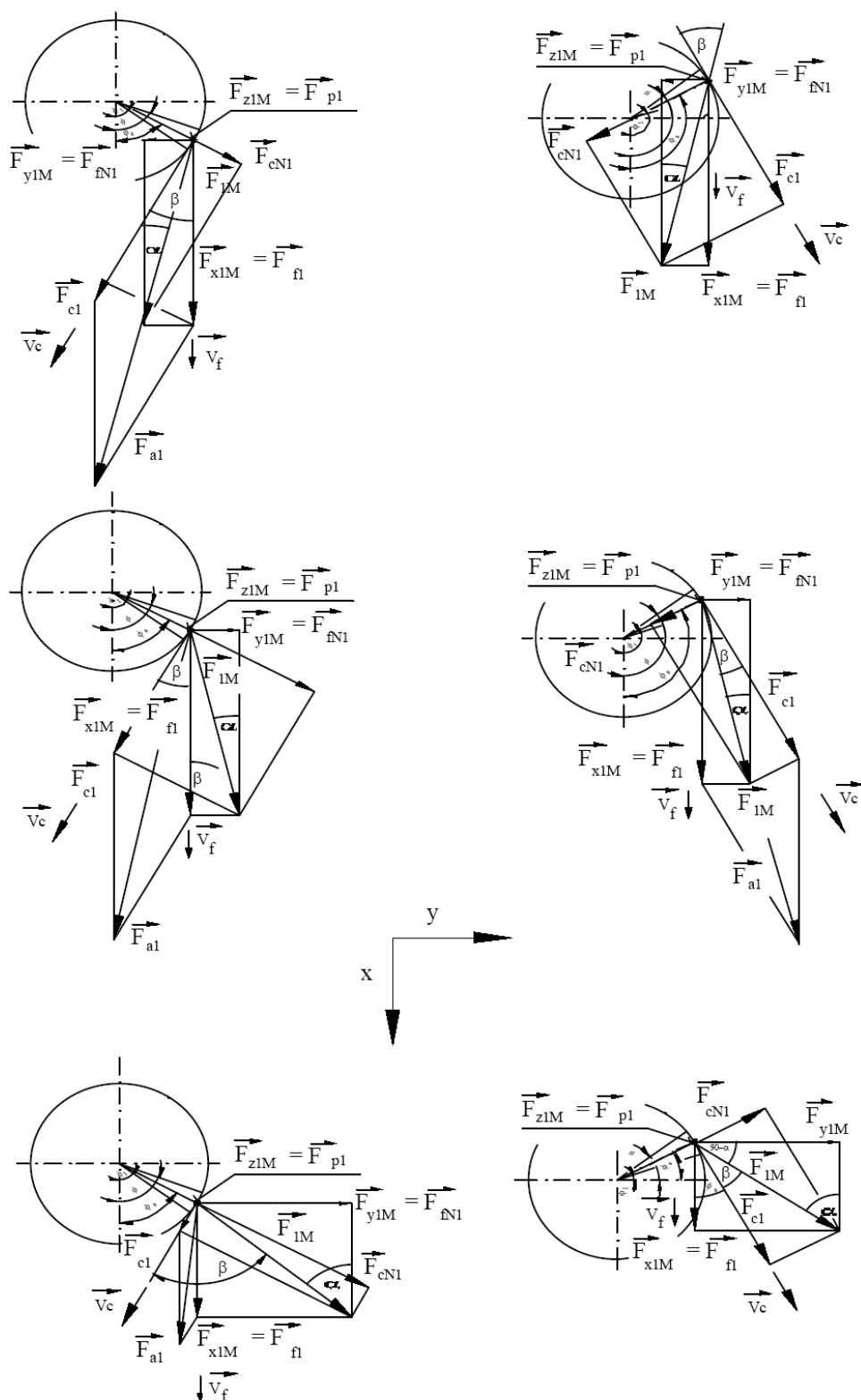
### 1.5.1. Rozvoj silového zatížení při frézování v průběhu opotřebení

V průběhu opotřebení frézovacích nástrojů dochází ke změně silových poměrů na břitu nástrojů. Nejvíce patrná je změna silových poměrů u nástrojů se zuby ve šroubovici (za předpokladu sousledného frézování), u kterých je neopotřebovaná fréza v důsledku pozitivních úhlů čela vtahována do řezu a postupně s rozvojem opotřebení dochází u zcela opotřebovaného nástroje k výraznému odtlačování frézy od obrobeného povrchu (viz obr. 1.11). Celkové zvýšení řezných sil běžně dosahuje 200%, ve výjimečných případech až 300% [16].

Opotřebení hřbetu nástroje a jeho vliv na celkové silové zatížení je popsán následujícím vztahem [16]:

$$dF = \sqrt{\left[\frac{\partial F_c}{\partial t} dt\right]^2 + \left[\frac{\partial F_f}{\partial t} dt\right]^2 + \left[\frac{\partial F_p}{\partial t} dt\right]^2} \quad (1.25)$$

, který vyjadřuje elementární přírůstek celkové síly.



Obrázek 1.11: Silový rozklad při nesousledném (vlevo) a sousledném frézování (vpravo) v průběhu opotřebení frézy [35].

## 1.5. SILOVÉ ZATÍŽENÍ PŘI FRÉZOVÁNÍ

Změna silového zatížení v závislosti na čase v ortogonální rovině může být také vyjádřena rovnicemi[35]:

$$dF_h = \frac{\partial F_h}{\partial t} dt = \frac{\partial F_h}{\partial \gamma_o} d\gamma_o + \frac{\partial F_h}{\partial r_n} dr_n + \frac{\partial F_h}{\partial R_a} dR_a + \mu dF_v \quad (1.26)$$

$$dF_v = \frac{\partial F_v}{\partial t} dt = \frac{\partial F_v}{\partial VB} dVB + \frac{\partial F_v}{\partial r_n} dr_n \quad (1.27)$$

, kde VB je šířka fazetky opotřebení na hřbetu nástroje,  $r_n$  je poloměr zaoblení ostří,  $\mu$  je koeficient tření (Newton-Colombův) a  $\gamma_o$  úhel čela v rovině ortogonální.

### 1.5.2. Metody měření silového zatížení při obrábění

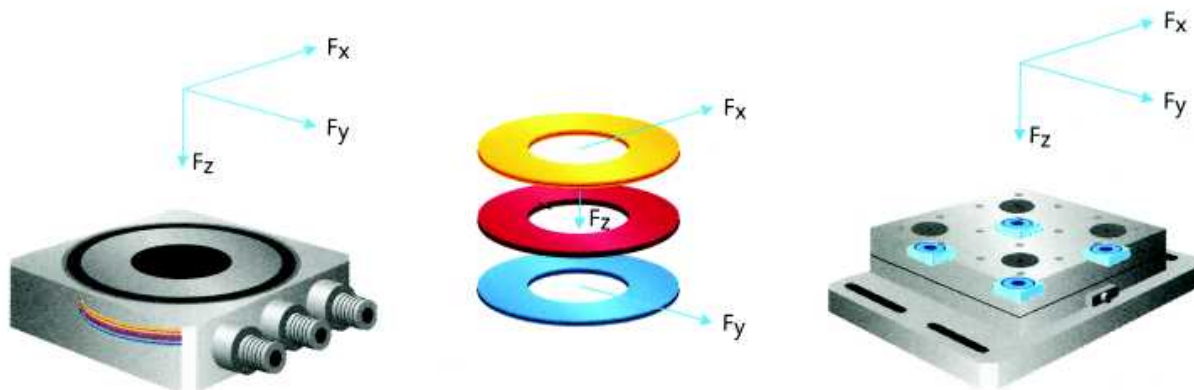
Metody měření silového zatížení je možné rozdělit na přímé a nepřímé. Nepřímá metoda je založena na měření rozdílu mezi příkonem a výkonem stroje, přičemž z hodnot měřených pomocí ampérmetru nebo měřicí aparatury je výpočtetně určena hodnota celkové síly. Za klíčový nedostatek této metody měření je nemožnost určení směru působení zjištěné síly. Za přímou metodu je považováno měření realizované pomocí piezoelektrických dynamometrů, popřípadě využití tenzometrických měřicích sestav. U těchto metod je realizováno měření řezných odporů, respektive měření reakcí na působení řezného nástroje na obrobku. Tyto reakce jsou dále transformovány na silové zatížení působící na řezný nástroj.[10]

#### Přímé metody

Přímé metody jsou založeny na přímém měření buď reakčních sil vyvolaných odřezáváním materiálu nebo na měření reakcí obrobku. K tomuto účelu byla zkonstruována zařízení nazývané dynamometry, které mohou být založeny na různých principech, přičemž v dnešní době nejpoužívanějšími jsou dynamometry piezoelektrické, z důvodu jejich jednoduchosti konstrukce, velkého měřicího rozsahu a přesnosti měření. Princip piezoelektrického dynamometru je znázorněn na obr. 1.12. Konstrukčně může být dynamometr proveden jako stacionární (viz obr. 1.13 vlevo) nebo rotační (viz obr. 1.13 vpravo). Pomocí stacionárního dynamometru, který je uchycen přímo na pracovním stole obráběcího stroje, jsou měřeny reakce obrobku na působení řezného nástroje ve statickém souřadném systému dynamometru v osách x, y, z. Snímáno může být buď silové zatížení v jednotlivých osách  $F_{xM}$ ,  $F_{yM}$ ,  $F_{zM}$ , případně je možnost měřit složky momentů  $M_x$ ,  $M_y$ ,  $M_z$ . Při frézování se silové zatížení mění co do velikosti i orientace v důsledku přerušovaného řezu a proměnného průřezu třísky. Poměrně obtížnou záležitostí se stává i synchronizace času měření se skutečným úhlem natočení frézy, proto jsou naměřená data za stacionárních dynamometrů často filtrována. Tuto nevýhodu odstraňují tzv. rotační dynamometry, které snímají přímo zatížení nástroje skrze dynamometry upínané přímo do vřetene stroje. Za jejich

nevýhodu se dá považovat možnost použití pouze na frézovacích strojích se stejným upínacím kuželem v dutině vřetene.

V případě měření pomocí stacionárních dynamometrů musí být měřené složky silového zatížení transformovány do jiných souřadných systémů (např. souřadných systémů dle ČSN 3002 do složek  $F_c$ ,  $F_{cN}$ ,  $F_p$  nebo do souřadného systému roviny stříhu se složkami  $F_{sh}$ ,  $F_{shN}$ ).



Obrázek 1.12: Princip měření piezoelektrického dynamometru.

## Nepřímé metody

Nepřímé metody je možné rozdělit na metody založené na sledování stavu a opotřebení nástroje a na metody vycházející z měření elektrických veličin.

Nepřímé metody jsou založené na sledování průvodních jevů obrábění, např. sledování stavu a opotřebení nástroje, mezi které patří například sledování akustické emise, nebo monitoring vibrací při obrábění. Tyto metody jsou výhodné pro jejich jednoduchou použitelnost v praxi, pouhým využíváním lidských smyslů. Samozřejmě se v tomto případě nejedná o přesnou kvantifikaci a udio-signalů a záznam frekvence či kvantifikaci amplitudo-frekvenční charakteristiky při monitorování vibrací. Kvantifikace a analýza je možná v případě využití mikrofону s dostatečným rozsahem frekvencí a zařízení pro záznam a analýzu zvuku. Monitorování vibrací v průběhu obrábění je mnohem složitější a pro kvantifikaci je potřebné využít tzv. akcelerometrů, v ideálním případě umístěných co nejblíže k ostří rezného nástroje[36], [32].

Mezi nepřímé metody měření silového zatížení je možné zařadit zejména měření výkonových charakteristik elektromotoru obráběcího stroje. Pro měření jsou využívány tzv. wattmetry, na kterých je možné odečítat přímo údaj o aktuálním výkonu stroje. Převážná většina obráběcích strojů je poháněna třífázovými asynchronními elektromotory a v závislosti na požadavcích přesnosti měření je využíváno různých zapojení wattmetrů, které jsou určeny pro měření časových závislostí činného či jalového výkonu [37], [36]. Většina moderních CNC obráběcích center má softwarové vybavení s možností odečítání stavu zatížení motoru (poskytují údaj o aktuálním procentuálním zatížení) a v závislosti na



## 1.5. SILOVÉ ZATÍŽENÍ PŘI FRÉZOVÁNÍ

aktuální zátěži je možné obráběcí proces aktivně ovlivňovat přímým zásahem do velikosti technologických veličin.



Obrázek 1.13: Typy piezoelektrických dynamometrů - vlevo stacionární, vpravo rotační [40].

### 1.5.3. Data silových záznamů a jejich analýza

#### Rozvoj frekvenčního spektra - možnosti využití v oblasti testování nástrojů

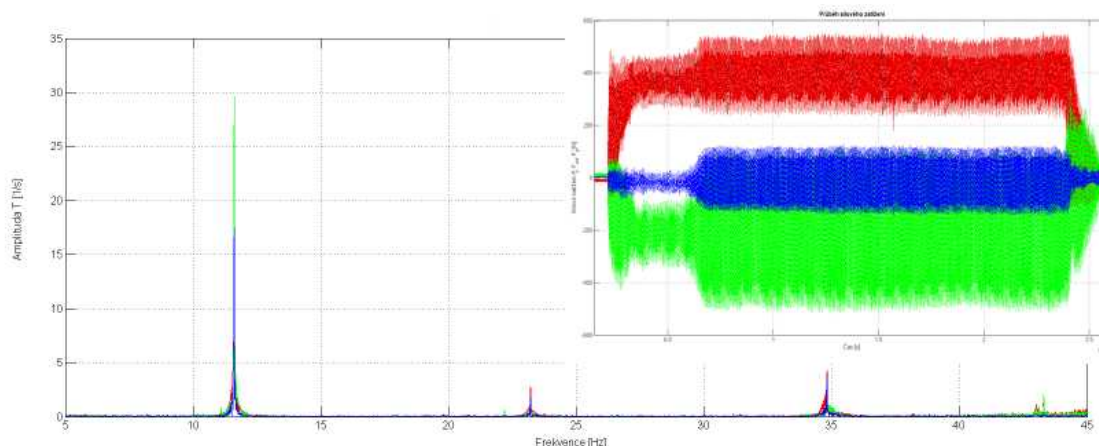
Hlavním nástrojem využitelným pro mnoho vědeckých aplikací je Fourierova transformace. Fourierův integrál je definován pomocí vztahu:

$$H(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} h(t) e^{j2\pi ft} dt \quad (1.28)$$

Jedna z možných aplikací Fourierovy transformace v technologii obrábění je zjištění dominantní frekvence z dat získaných pomocí analýzy silového zatížení při frézování. Naměřená data (viz obr. 1.14) jsou zpracována pomocí algoritmu FFT, přičemž se získá frekvenční spektrum, ve kterém by měla být viditelná pouze jedna dominantní frekvence, kterou je frekvence zubová, popřípadě její násobky. V případě zjištěných dalších významných frekvencí je třeba provést analýzu dané frekvence a vypátrat její původ. V mnoha případech, převážně u strojů staršího data výroby, může být pomocí této frekvence například diagnostikován problém v převodovce stroje a může přispět k přesnému zjištění problémového místa (opotřebovaného ozubeného kola atd.).

Převodem záznamu silového zatížení na obr. 1.14 vpravo do frekvenčního spektra je možné určit, že oblast záznamu obsahuje pouze jednu frekvenci, kterou je frekvence zubová, a její harmonické násobky. Může být určena dle vztahu:





Obrázek 1.14: Příklad rozvoje frekvenčního spektra pro frézování čtyřbřitou stopkovou frézou.

$$f_z = \frac{n}{60} \cdot z \cdot k \quad (1.29)$$

, kde  $n$  jsou otáčky,  $z$  je počet zubů nástroje a  $k$  jsou harmonické násobky ( $k=1, 2, 3, 4, \dots$ ).

Z dalších aplikací Fourierovy transformace je možné uvést například analýzu dynamické stability řezného nástroje, obrobku a další, což je uvedeno v kapitole 1.4.

## 1.6. Charakteristika experimentálních zkoušek

Dle časové náročnosti mohou být technologické zkoušky povlaků rozděleny na zkoušky:

- krátkodobé (tyto zkoušky se realizují převážně s nástroji ostrými),
- dlouhodobé (zkoušky se provádí v celém rozsahu trvanlivosti nástroje a průběhu rozvoje opotřebení až do destrukce nástroje nebo dosažení stanovené míry opotřebení nástroje, případně nastoupení určitého jevu, zamezujícího dalšímu obrábění).

### 1.6.1. Krátkodobé zkoušky

Hlavními cíli krátkodobých zkoušek je zejména hledání závislostí, které nejsou výrazně ovlivněny rozvojem opotřebení, a je tedy možné je do jisté míry zanedbat. Přípustnou velikost chyby měření je možné posoudit na základě stability měřeného signálu. V případě, že má měřená veličina rostoucí nebo klesající trend, je to typickým projevem nestability děje, přičemž je následně nutné analyzovat příčiny nestability). Ustálený charakter zatížení značí víceméně stagnující rozvoj opotřebení a měření je v takovém případě možné považovat za přípustné. Vlastní metodika zkoušky je realizována gradací řezných podmínek, tzn. je postupováno od nejméně náročných režů až k nejvíce náročným úběrům. Pomocí

## 1.7. HODNOCENÍ STAVU OPOTŘEBENÍ NÁSTROJŮ

těchto zkoušek je možné určovat např. závislost zatížení nástroje na řezných podmínkách, které je potřebné pro dimenzování pohonů strojů. [38, 39]

### 1.6.2. Dlouhodobé zkoušky

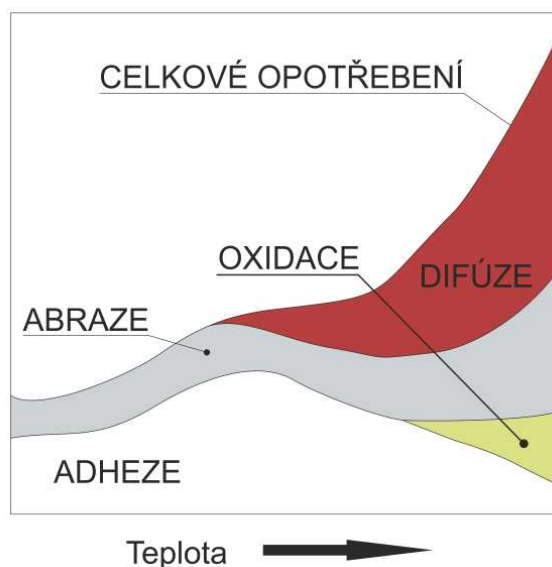
Cílem dlouhodobých zkoušek je popis vybraných ukazatelů v závislosti na čase obrábění, případně na počtu odvrtných děr, dosažené hloubce vrtání, objemu odebraného materiálu atd. Mezi základní podmínky úspěšnosti je nastavení řezných podmínek takových, aby nedošlo k překrytí sledovaného děje jiným dějem. Hlavní a nezastupitelnou výhodou dlouhodobých zkoušek je jejich přímá návaznost na ekonomické analýzy, neboť je zjištěna celková trvanlivost nástroje v závislosti na řezných podmínkách. Tímto napomáhá vytvořit komplexní obraz o úspěšnosti PVD povlaků, jejich rentabilitě a dalších parametrech sledované technologie.

Z uvedeného rozboru vyplývá nutnost rozvoje nepřímého měření opotřebení řezného břitů, které lze realizovat například měřením řezných sil nebo řezných odporů pomocí dynamometrů, které by zčásti nebo úplně eliminovalo výše uvedené problémy. Výsledky těchto měření je pak možno integrovat například do ovládání číslicově řízených obráběcích strojů, které mají možnost zpracování signálů ze zabudovaných snímačů zatížení pohonů nebo přímo zatížení držáků nástrojů. [38, 39, )] Takto řízený proces se pak může vykazovat vysokou spolehlivostí z pohledu kontroly stavu opotřebení řezných břitů, které lze včas vyměnit ručně nebo automaticky (aplikace tzv. „twin“ nebo „duplo“ nástrojů).

## 1.7. Hodnocení stavu opotřebení nástrojů

Charakteristické formy opotřebení mohou být kvantifikovány na základě měření kritérií opotřebení (VB, VC, KT, ad.) definovaných dle normy ISO 3685, případně může být rozvoj opotřebení sledován na základě měření silového zatížení nástroje (např. axiální síly a krouticího momentu). Analýzy měření průběhů opotřebení jsou dnes již víceméně rutinní záležitostí, nicméně mají svá úskalí spočívající především v těchto skutečnostech [38]:

- u vícebřitých nástrojů nemusí opotřebení probíhat na všech břitech stejnoměrně,
- vlastní rozvoj opotřebení má různou intenzitu na čelních a hřbetních plochách hlavních, vedlejších, resp. příčných ostří, což komplikuje měření,
- při použití běžných dílenských světelných mikroskopů lze obtížně odlišovat skutečné míry ploch opotřebovaných od ploch reflektujících světlo v důsledku jejich záběhu a zanesení částicemi obráběného materiálu,
- měření komplikuje nárůstek a ulpělé částice třísek - odstranění nárůstku za účelem měření může vést k nechtěné delaminaci povlaku i poškození ostří,



Obrázek 1.15: Podíl mechanismů opotřebení řezného nástroje v závislosti na teplotě [16].

- obrábění je nutno zastavovat za účelem měření, což prodlužuje dobu experimentů.

### 1.7.1. Měření opotřebení, kritéria

Opotřebení řezných nástrojů je průvodním jevem procesu obrábění při němž dochází k vzájemné interakci řezného nástroje a obráběného materiálu. Opotřebení nástroje je velmi složitý proces, závisející na mnoha faktorech, např. fyzikálních a mechanických vlastnostech obráběného a nástrojového materiálu, druhu obráběcí operace a řezu, geometrii nástroje, řezných podmínkách, a dalších. Základní mechanismy opotřebení je možné rozdělit na mechanismy fyzikálně-mechanické a chemické. Mezi fyzikálně-mechanické mechanismy patří např. abraze, adheze, plastická deformace, křehký lom, delaminace vrstev, a další. Mezi chemické je možné zařadit difúzi, oxidaci či termoelektrické opotřebení[16].

Kritéria kvantifikující míru opotřebení nazýváme kritéria opotřebení, mezi něž patří např. šířka fazetky na hřbetě VB, hloubka výmolu na čele KT, popřípadě radiální opotřebení špičky KVy. Míru opotřebení je možné hodnotit buď přímo nebo nepřímo. Mezi přímé metody hodnocení náleží pozorování změn opotřebení břitů v závislosti na čase (měření vybraného kritéria VB, KT, atd.), nebo měření hmotnostního úbytku nástroje (konvenčně nebo radioizotopovou metodou).

Dále je možné hodnotit opotřebení nepřímo, pozorováním změn velikosti silového zatížení, nárůstem výkonu potřebného k obrábění, změnou barvy a tvaru třísek, výskytu ostrin na hranách obrobku, změn rozměrů na obráběné součásti, nadměrnou hlučností při obrábění, atd.

### 1.7.2. Moderní možnosti hodnocení stavu opotřebení nástrojů

V současné době existuje celá řada přístrojového vybavení, které v kombinaci s moderními softwary a výkonnou výpočetní technikou přináší celou řadu možností. V laboratorních podmínkách je v současné době měřit opotřebení např. pomocí snímání silového zatížení a pozorování změn zatížení. Ze složek silového zatížení  $F_h$ ,  $F_{tr}$  a  $F_v$  je možné pozorovat změny geometrie nástroje, ale i rozvoj hřbetního a čelního opotřebení [35]. Jednou z výhod měření opotřebení tímto způsobem je například časová nenáročnost a současně úplný přehled o rozvoji jednotlivých forem opotřebení, ve srovnání s časovou náročností klasického přístupu (tzn. nutností přerušovat testování za účelem měření sledovaných kritérií).

Výzkumný tým [32] se zabýval monitorováním a záznamem akustického tlaku v průběhu frézování pomocí mikrofonu. Pomocí následné analýzy záznamu zvukového spektra sestavili tzv. 3D mapu akustického tlaku pro vyhodnocení souvislosti frekvence zvuku a dynamické stability procesu obrábění. Jejich výsledky potvrdily souvislost mezi dynamickou stabilitou a měřenou frekvencí zvuku. Pomocí snímání akustického tlaku je tedy teoreticky možné sledovat aktuální stav (stabilitu) procesu obrábění, potažmo nepřímo monitorovat stav opotřebení nástroje [41].

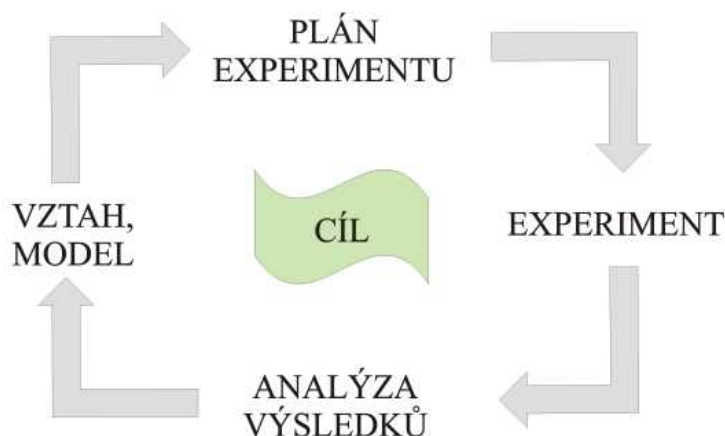
## 2. Plánování experimentu v oblasti testování řezných nástrojů

Každý vědecký výzkumný záměr je vždy podložen konkrétním plánem na jeho zpracování. Provádění experimentů je obvykle používáno za účelem zjistit informace o procesu či soustavě procesů, přičemž je vždy cílem převážné většiny druhů experimentů charakterizovat souvislost měřené veličiny (závislé proměnné) a skupiny faktorů (tzv. nezávislé proměnné). Pro získání věrohodných, ověřených a objektivních závěrů při řešení výzkumných úkolů, ale i inženýrských problémů v praxi, je nutné shromáždit vhodná data pro měření a jejich následnou analýzu.

Právě plánovaný experiment (DOE) je prostředkem, který v kombinaci se statistickým přístupem je nezbytným prostředkem k odlišení významných a bezvýznamných faktorů či závěrů. V každém odvětví lidské činnosti vzniká prostor pro chyby, proto je použití statistických metod jediným objektivním prostředkem analýzy dat. [40]

### 2.1. Znaky plánovaného experimentu

Plán experimentu je nezbytným prostředkem ve vědeckém, ale i inženýrském světě pro zlepšení výrobního procesu. V plánovaném experimentu jde o vytvoření takových podmínek, aby rozsah experimentu byl co nejmenší, ale forma informací co nejkvalitnější [42, 43]. Strategie efektivního plánování je znázorněna v diagramu na obr. 2.1. Z teoretického hlediska je tedy vhodné neustále opakovat celý cyklus, z praktického hlediska bývá měření mnohdy velmi obtížně proveditelné, či finančně nákladné a experimentátor se musí rozhodovat na základě určitého omezeného množství nasbíraných dat. Zejména experimenty prováděné ve výrobních podnicích bývají problematické.



Obrázek 2.1: Strategie efektivního plánování [43].

## 2.2. Principy plánování experimentu a typy plánů

Základními principy experimentálního plánu jsou *randomizace*, *replikace* a *blokování* [42, 43, 44]. *Randomizace* slouží ke znáhodnění pořadí testů, aby nevznikla systematická chyba a experimenty byly provedeny v náhodném pořadí. Cílem tohoto principu je zabránit systematickému působení rušivého vlivu na odezvu, kterou může být např. únava operátora. *Replikace* je opakování měření při stejné úrovni nebo kombinaci úrovní. Tento způsob nám může dopomoci odhadnout nepřesnost měření a zvýšit spolehlivost závěrů. *Blokování* se často používá zejména pro zredukování či eliminaci variability způsobené faktory, které mohou ovlivnit měřenou veličinu (odezvu), ale pro nás jsou nezajímavé. Velmi často se uplatňuje v provozním či provozním měřítku, kde při opakování experimentů bývá velmi často obtížné udržet pokaždé stejné podmínky vlivem kolísání hodnot proměnných, které nejsou předmětem zkoumání. Např. se může jednat o obráběný materiál ze stejné dávky, povlaky řezných nástrojů z různých dávek, řezné nástroje atd.

Při testování nástrojů v technologii obrábění jsou zpravidla získávána data pomocí měření silového zatížení, případně sledováním souvisejících jevů, jako je například tepelné zatížení, kontaktní délka, tvorba třísky, případně může být sledována i integrita povrchu atd. Sledované parametry procesu jsou ovlivňované mnoha faktory a negativními jevy, ke kterým během obrábění dochází.

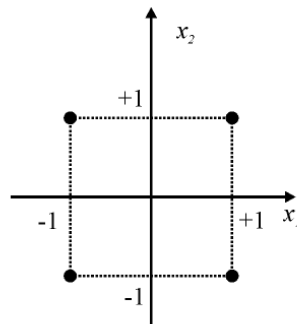
Pro eliminaci jakéhokoliv nepravdivého statistického výsledku při analýze dat, který by mohl být důsledkem různých rozměrů každého z faktorů, se používá normovaných (kódovaných) úrovní faktorů. Pro dvouúrovňové systémy nabývají po provedení normování faktory hodnot -1 a +1. Normovaná úroveň faktoru je určena dle vztahu:

$$NL = \frac{X - \frac{(LL+HL)}{2}}{\frac{(HL-LL)}{2}}, \quad (2.1)$$

kde  $NL$  je normovaná úroveň,  $LL$  je dolní úroveň faktoru a  $HL$  je horní úroveň faktoru. Normované proměnné jsou dále označeny jako  $x_1, x_2, \dots, x_k$ . Pro matici plánu experimentu platí, že první sloupec je tvořen fiktivní proměnnou  $x_0$ , pro kterou platí  $x_{i0}=1$

### 2.2.1. Faktorové experimenty s jedním faktorem

Mezi nejjednodušší experiment se řadí faktoriální experiment s jedním faktorem, přičemž faktor může být uvažován se dvěma či více úrovněmi (kdy jsou například zvoleny dvě úrovně řezných rychlostí, přičemž ostatní nastavitelné parametry - posuv, šířka záběru ostří - zůstávají konstantní). Počet úrovní je dán povahou řešeného problému, případně může být zvolen (volba počtu úrovní přichází v úvahu častěji u měřitelných veličin). Vliv na výsledky měření nemusí mít nezbytně pouze zkoumaný faktor, jehož úrovně jsou měněny. Z dalších příčin je možné uvést například náhodné vlivy, které jsou součástí každého procesu, nebo vymezitelné příčiny, které sice nejsou předmětem zájmu, ale je výhodné zahrnout je do experimentu jako blokové faktory. Úrovně blokového faktoru jsou



Obrázek 2.2: Normované hodnoty ortogonálního plánu experimentu a hladiny měření faktorů [42].

často určeny dosažitelnými experimentálními podmínkami, v případě testování nástrojů se jedná například o omezení dané pevností daného nástroje, tj. rozsahem posuvů, řezných rychlostí, šířky záběru ostří atd.

### 2.2.2. Faktorové experimenty

Nejefektivnějším prostředkem pro experimenty vyšetřující vliv dvou a více faktorů na odezvu jsou tzv. faktorové experimenty[43]. Je-li vyšetřováno několik faktorů, volíme úplný či zkrácený faktorový experiment, případně centrálně kompoziční plán experimentu. Úplný faktorový experiment zahrnuje všechny možné kombinace úrovní zkoumaných faktorů, přičemž ve zkráceném faktorovém experimentu jsou některé kombinace vynechány. V praxi jsou často využívány faktorové experimenty se dvěma či třemi úrovněmi faktorů. Pokud je počet faktorů vyšší, dá se využít s výhodou zkráceného experimentu s polovičním (čtvrtinovým, osminovým, atd.) počtem měření. Faktorové experimenty je možné použít i ke stanovení empirického modelu, který znázorňuje tvar závislosti sledované veličiny na měřitelných faktorech[42]. Pomocí tohoto modelu můžeme určit, při kterých nastaveních zkoumaných faktorů dosáhneme optimální hodnoty sledované veličiny (tzv. response surface/response contour). Ortogonální plán experimentu je takový plán experimentu  $X$ , ve kterém jsou všechny sloupce matice  $X$  na sebe kolmé. Pokud má každý faktor právě dvě úrovně je možné provést tzv. normování, aby obě úrovně všech faktorů měly hodnoty  $-1$  a  $+1$ . Počet řádků matice  $X$  je roven počtu všech měření, včetně opakovaných měření.

$$X = \begin{pmatrix} x_0 & x_1 & x_2 \\ 1 & -1 & -1 \\ 1 & 1 & -1 \\ 1 & -1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} \quad (2.2)$$

Pro experimenty se dvěma úrovněmi pro každý faktor se předpokládá přibližně lineární odezva. Výsledek experimentu, který znázorňuje závislost sledované veličiny na mě-

## 2.2. PRINCIPY PLÁNOVÁNÍ EXPERIMENTU A TYPY PLÁNŮ

řehých faktorech, lze následně popsat pomocí lineárního regresního modelu vyjádřeného dle rovnice[45]:

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i \cdot x_i + \sum_{i < j} \beta_{ij} \cdot x_i \cdot x_j + \varepsilon, \quad (2.3)$$

kde  $\beta_i$  je lineární účinek faktoru  $x_i$ ,  $\beta_{ij}$  vyjadřuje interakci faktorů  $x_i$  a  $x_j$ ,  $\varepsilon$  je náhodná chyba. Neznámé regresní koeficienty se určují pomocí metody nejmenších čtverců, přičemž touto metodou je následně možné určit, jaká úroveň nastavení zkoumaných faktorů je optimální. Pro odhad experimentální chyby se provádí několik měření ve středu plánu, kterému odpovídá normovaná úroveň faktoru nula, přičemž nemají přidána pozorování vliv na odhady regresních koeficientů a umožňují posoudit adekvátnost modelu. Pokud se prokáže neadekvátnost modelu prvního řádu nebo se předpokládá nelineární závislost odezvy na některých faktorech, je třeba hledat složitější tvar modelu, který je vyjádřen dle rovnice[45]:

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i \cdot x_i + \sum_{i < j} \beta_{ij} \cdot x_i \cdot x_j + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} \cdot x_i^2 + \varepsilon, \quad (2.4)$$

kde je kvadratický účinek faktoru  $x_i$  je vyjádřen parametrem  $\beta_{ii}$ .

Pro odhad regresních parametrů modelu druhého řádu je třeba do plánu experimentu zahrnout nejméně tři úrovně pro každý faktor, z čehož vyplývá velmi vysoký počet měření pro vysoký počet vstupních faktorů. Pro praktickou aplikaci by znamenal vysoký počet měření velkou rozsáhlost, proto se používá více sofistikovaných plánů (např. centrálně kompoziční, rotabilní) [42, 43].

### 2.2.3. Response surface design experimenty

Experimenty response surface design jsou určeny pro konstrukci tzv. odezvových ploch bez nutnosti provádět úplný faktorový experiment, který je náročný jak po časové, tak i po finanční stránce. Mezi tento druh plánů experimentu se řadí tzv. centrálně kompoziční plán. Pro centrálně kompoziční plán se provádí měření v tzv. jádru plánu, hvězdicových bodech a v centrálních bodech (viz tabulka 2.1) [42].

Celkový počet měření je u centrálně kompozičního plánu roven:

$$N = N_0 + 2k + n_c, \quad (2.5)$$

kde  $N_0$  je počet měření,  $2k$  je počet hvězdicovitých bodů a  $n_c$  je počet bodů centrálních. Celkový počet měření je nižší než u faktorového experimentu, přičemž centrálně kompoziční plán využívá pět úrovní pro každý faktor ( $0, \pm a, \pm 1$ ). Vzdálenost  $a$  ovlivňuje rotabilitu plánu, jejíž význam spočívá v tom, že rozptyl odezvy je v libovolném bodě funkcí vzdálenosti od středu plánu a není závislý na směru[42, 43]. Přesnost odhadu ode-



## 2. PLÁNOVÁNÍ EXPERIMENTU V OBLASTI TESTOVÁNÍ ŘEZNÝCH NÁSTROJŮ

Tabulka 2.1: Struktura matice plánu pro centrálně kompoziční plán[42].

	$x_0$	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$\dots$	$x_k$	počet měření
jádro plánu	1	-1	-1	-1	$\dots$	-1	$2^k$ nebo $2^{k-p}$
	1	1	-1	-1	$\dots$	-1	
	1	-1	1	-1	$\dots$	-1	
	1	1	1	-1	$\dots$	-1	
	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	
	1	1	1	1	$\dots$	1	
hvězdicovité body	1	-a	0	0	$\dots$	0	$2k$
	1	a	0	0	$\dots$	0	
	1	0	-a	0	$\dots$	0	
	1	0	a	0	$\dots$	0	
	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	
	1	0	0	0	$\dots$	-a	
centrální body	1	0	0	0	$\dots$	0	$n_c$
	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	
	1	0	0	0	$\dots$	0	

zvy je ve všech směrech stejná, díky neznámé poloze optima před samotným provedením experimentu[42].

## 2.3. Zpracování naměřených dat a jejich analýza

### 2.3.1. Test adekvátnosti modelu

Data naměřená na základě plánu experimentu jsou využita k sestavení modelu. Model získaný na základě jednoho měření je nebezpečné považovat za správný, protože nemáme představu o nepřesnosti měření, kterou jsme schopni získat na základě replik (opakovaných měření za stejných podmínek). V případě adekvátnosti modelu je požadováno, aby se vzdálenost modelu od naměřených hodnot (průměrných hodnot) významně nelišila od přesnosti měření. Pokud měření provedeme na  $n$  úrovních, přičemž na každé úrovni bude  $p_i$  měření pro  $i = 1, 2, \dots, n$ . Celkem máme k dispozici  $N = \sum_{i=1}^n p_i$  měření, která označíme  $y_{ij}$ ,  $i = 1, 2, \dots, n$ ,  $j = 1, \dots, p_i$ . Jestliže alespoň jedno  $p_i > 1$ , pak můžeme odhadnout nepřesnost měření pomocí měření rozptylu [42, 43]:

$$s_e^2 = \frac{1}{N - n} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{p_i} (y_{ij} - \bar{y}_i)^2 \quad (2.6)$$

,kde

$$\bar{y}_i = \frac{1}{p_i} \sum_{j=1}^{p_i} y_{ij}$$

## 2.3. ZPRACOVÁNÍ NAMĚŘENÝCH DAT A JEJICH ANALÝZA

je průměrná hodnota na  $i$ -té úrovni. Mírou vzdálenosti modelu od průměrných hodnot je rozptyl:

$$s_r^2 = \frac{1}{n-k} \sum_{i=1}^n (\bar{y}_i - \hat{y}_i)^2, \quad (2.7)$$

kde hodnota  $\hat{y}_i$  je vypočtená hodnota z modelu pro  $i$ -tý bod měření a  $k$  je počet členů v modelu. Jestliže platí nerovnost  $F \geq F(1-\alpha, n-k, N-n)$  pro:

$$F = \frac{s_r^2}{s_e^2}, \quad (2.8)$$

kde  $F(1-\alpha, n-k, N-n)$  je kvantil F-rozdělení na hladině  $\alpha$ , pak zamítáme hypotézu o adekvátnosti modelu a musíme zvolit model složitější, například je možné přidat další členy do modelu. Je potřeba posoudit významnost vypočtených koeficientů.

### 2.3.2. Významnost koeficientů

Pro model ve tvaru  $y = b_0 + b_1x_1 + \dots + b_kx_k$  je určen koeficient  $b_i$  s nenulovou hodnotou, je třeba posoudit zda je statisticky různý od nuly. Tato záležitost se dá určit na základě určení nepřesnosti každého z koeficientů. Rozptyl koeficientu  $b_i$  se dá určit na základě vztahu[42, 43]:

$$D(b_i) = s^2 V_{ii}, \quad (2.9)$$

kde  $V_{ii}$  je prvek z  $i$ -tého řádku a  $i$ -tého sloupce matice  $(\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1}$  a celkový rozptyl:

$$s^2 = \frac{(N-n)s_e^2 + (n-k)s_r^2}{N-k}. \quad (2.10)$$

Jestliže pro  $t = \frac{b_i}{\sqrt{D(b_i)}}$ , platí nerovnost  $|t| \geq t(1-\alpha/2, N-k)$ , kde  $t(1-\alpha/2, N-k)$  je kvantil t-rozdělení, pak zamítáme hypotézu o nevýznamném rozdílu mezi testovaným koeficientem a nulou.

### 3. Testování nástrojů pro specifické podmínky obrábění

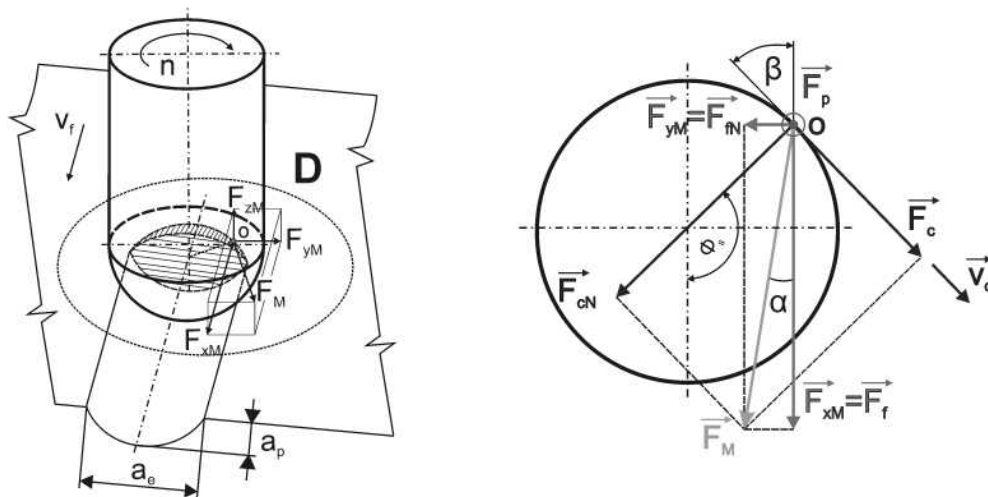
Při frézování součástí na obráběcích centrech jsou využívány různé nástroje pro obrábění rovinných, tvarových ploch, drážek a dalších typů ploch. Testování nástrojů nebylo tedy omezeno pouze na nástroje pro obrábění tvarových ploch, ale rovněž byly testovány nástroje pro obrábění ploch rovinných. Mezi jednu z hlavních úloh disertační práce patří implementace metod plánovaného experimentu a pokročilého statistického zpracování dat do oblasti problematiky testování rezných nástrojů.

Tato kapitola je zaměřena na popis provedených experimentálních zkoušek a analýzu výsledků. Zhodnocení výsledků a závěrečná doporučení jsou obsahem dalších kapitol.

#### 3.1. Experimentální zkoušky, metodika měření a jejich charakteristika

Měření silového zatížení probíhá v kartézském souřadném systému orientovaném dle dynamometru, který snímá reakce vyvolané odebráním třísky nástrojem v průběhu obrábění. Pro lepší orientaci je vhodné dynamometr sesouhlasit se souřadným systémem obráběcího stroje. Složky takto získaného silového zatížení  $F_{xM}$ ,  $F_{yM}$  a  $F_{zM}$  mohou být dále transformovány do jiného souřadného systému. V závislosti na úhlu natočení frézovacího nástroje dochází ke změně silového zatížení z důvodu proměnné tloušťky třísky v průběhu frézování. Jelikož je synchronizace času měření s úhlem natočení frézy velmi obtížná, měření byla vyhodnocována pro maximální hodnotu síly na jednom zubu v záběru, přičemž tato hodnota odpovídá hodnotě maximálního průřezu třísky. Ze souboru naměřených dat vyexportovaných ze softwaru Dynoware ve formátu ASCII je oddělena počáteční a koncová fáze, celý soubor dat s  $n$  prvky je rozdělen na  $j$  intervalů a v těchto intervalech jsou hledána lokální maxima celkové síly dle vztahu:

$$F_j = \max \left\{ \sqrt{F_{xM}^2 + F_{yM}^2 + F_{zM}^2} \right\} \mid i \in \langle 1; p \rangle, j \in \langle 1; n/p \rangle. \quad (3.1)$$



Obrázek 3.1: (a) Schematické znázornění silových složek při frézování tvarovým nástrojem, (b) znázornění rozkladu silového zatížení frézovacího nástroje.

Hodnoty naměřených silových složek je možné v kartézském souřadném systému popsat jako:

$$(F_{x_{Mi}}, F_{y_{Mi}}, F_{z_{Mi}}), \quad (3.2)$$

kde  $i = \{1, \dots, N\}$ .

Výslednici jednotlivých měřených silových komponent je možné určit podle vztahu:

$$F_{Mi} = \sqrt{F_{x_{Mi}}^2 + F_{y_{Mi}}^2 + F_{z_{Mi}}^2} \quad (3.3)$$

a dále transformovat do jiných souřadnicových soustav, např. do soustavy definované dle normy ČSN ISO 3002 vztahem:

$$F_i = \sqrt{F_{c_i}^2 + F_{c_{Ni}}^2 + F_{p_i}^2}. \quad (3.4)$$

Dle uvedených skutečností byl sestaven specializovaný skript pro zpracování velmi rozsáhlých datových souborů pro filtraci a separaci datových souborů v programu Matlab a data byla „filtrována“ (vytvořený skript je přiložen na přiloženém DVD disku). Specializovaný skript pro zpracování rozsáhlých datových souborů byl vytvořen v návaznosti na předchozí uživatelské znalosti autora a na základě dalšího studia literatury o systému Matlab[46, 47]. Filtrovaná data byla dále zpracovávána a statisticky vyhodnocena. Sestavování plánů jednotlivých experimentů bylo prováděno za pomoci specializovaného programu Minitab, v němž byla rovněž vyhodnocována získaná data.

## 3.2. Testování nástroje pro rovinné HSC obrábění Al slitiny

Na základě spolupráce s firmou CemeCon se sídlem v Ivančicích vznikl požadavek na testování vyměnitelných břitových destiček vyrobených ze slinutého karbidu pro aplikační oblast obrábění hliníkových slitin s vysokým obsahem křemíku, používaných pro výrobu bloků motorů automobilů. Moderní PVD povlaky jsou schopny odolávat i silnému abrazi- nímu opotřebení, a díky vývoji řezných materiálů i povlaků je možné využívat povlaky pro náročnější aplikace a podmínky obrábění. Na základě tohoto vznikl předpoklad k využití VBD ze SK s moderním PVD povlakem pro vysokorychlostní frézování hliníkových slitin s vysokým obsahem křemíku (více než osm procent), pro které se aplikují řezné nástroje vyrobené ze supertvrdých materiálů, které jsou podstatně nákladnější.

### 3.2.1. Cíl experimentu

Cílem experimentálních zkoušek bylo srovnání řezivostních vlastností povlakovaných VBD ze slinutého karbidu pro nástroj určený pro obrábění těžkoobrobitelných neželezných kovů, používaných v aeronautickém a automobilovém průmyslu. Relativní srovnání kvality povlaků bylo provedeno vůči jinému výrobcí PVD povlaků. Přehled posuzovaných nástrojů je uveden v tab. 3.1.

Tabulka 3.1: Přehled testovaných povlaků a jejich vlastností.

Typ povlaku	Struktura	Složení	Max. prac. tepl. [°C]	Tloušťka [μm]	Tvrdost [GPa]	Označení série
Nepovla- kovaný	-	-	-	-	-	Al
AluSpeed	monovrstva	TiB <sub>2</sub>	900	2,5 - 2,8	40	Als
Darwin	nano kom- pozitní	(Al <sub>x</sub> Ti <sub>1-x</sub> )N	> 800	1,8 - 2,1	40	Ald
Tripple Alwin	nano kom- pozitní	(Cr <sub>1-x</sub> Al <sub>x</sub> )N	> 1000	1,8 - 2,2	35	Alw

#### 3.2.2. Popis experimentu

##### Obráběcí stroj, řezný nástroj a jeho upnutí

Experimentální obrábění bylo realizováno na vertikální frézce FD32V (obr. 3.2), kterou je vybavena dílna C2 na ÚST FSI VUT v Brně. Tento stroj zabezpečuje dostatečnou tuhost vřetene, proto byl zvolen pro danou aplikaci čelní frézování. V dutině pro upínání nástrojů je kužel ISO 50. Stroj umožňuje dosažení otáček  $1440 \text{ min}^{-1}$ . Použitím frézovací hlavy  $\varnothing 250 \text{ mm}$  bylo dosaženo řezné rychlosti  $1100 \text{ m.min}^{-1}$ .

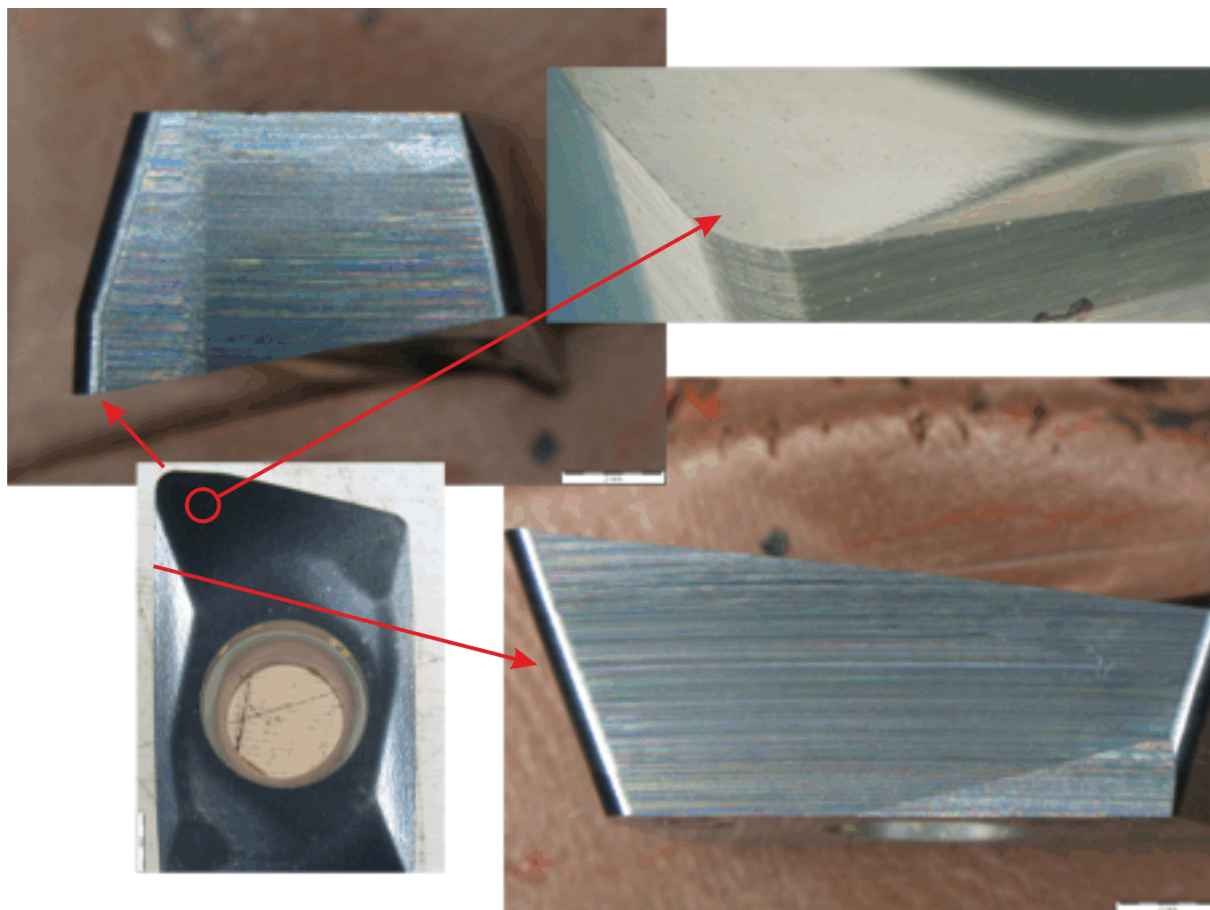


Obrázek 3.2: Vertikální frézka FD32V.

Pro danou aplikaci - vysokorychlostní obrábění hliníkových slitin s obsahem křemíku více než osm procent byla zkonstruována speciální čelní frézovací hlava  $\varnothing 250 \text{ mm}$  nástrčná, upnutá na upínací trn ISO 50, určená pro vyměnitelné břitové destičky ADEX 160608FR-FA. Geometrie čelní frézovací hlavy je znázorněna na výkresech v příloze II-1,2,3.

Mechanicky upínané vyměnitelné břitové destičky (ADEX 160608FR-FA) jsou destičky s vysoce pozitivní geometrií s leštěným čelem pro omezení nalepování obráběného materiálu (viz obr. 3.3), oblast použití je obrábění materiálů skupiny N. Destičky jsou vyrobené ze substrátu HF7 (složení substrátu - WC (93) + Co (7)), výrobcem nástrojů Pramet Tools, s.r.o.

### 3. TESTOVÁNÍ NÁSTROJŮ PRO SPECIFICKÉ PODMÍNKY OBRÁBĚNÍ



Obrázek 3.3: Detailní snímky vyměnitelné břitové destičky, hlavní a vedlejší hřbet, leštěné čelo.

#### Materiál obrobku

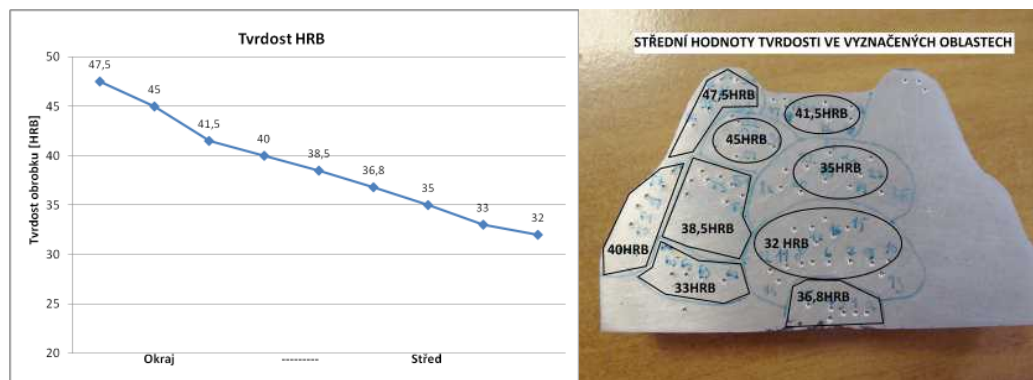
Materiálem obrobku byla slévárenská slitina hliníku  $\text{AlSi9Cu3(Fe)}$ , hojně využívaná v dnešním automobilovém průmyslu pro výrobu bloků motorů. Chemické složení materiálu je uvedeno v tab. 3.2, detailní analýza materiálu od výrobce je obsažena v příloze I. Experimentální obrábění bylo provedeno na gravitačně lité hliníkové slitině se specifickým tvarem lichoběžníkového průřezu viz obr. 3.4 vpravo, bez tepelného zpracování. Z obráběného materiálu byly odebrány vzorky a měřena tvrdost v různých částech materiálu. Byl zjištěn značný rozptyl ve tvrdosti (až 35%) v jednotlivých oblastech obrobku, jak je ukázáno v diagramu na obr. 3.4 vlevo.



### 3.2. TESTOVÁNÍ NÁSTROJE PRO ROVINNÉ HSC OBRÁBĚNÍ AL SLITINY

Tabulka 3.2: Chemické složení materiálu obrobku.

Slitina	Chemické složení [hm. %]								
AlSi9Cu3	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Pb	Sb	Sn
	8,570	0,826	2,380	0,261	0,391	1,180	0,084	0,004	0,041



Obrázek 3.4: Změna tvrdosti materiálu obrobku od okraje ke středu.

#### Řezné podmínky

Řezné podmínky byly stanoveny na základě požadavku na použití VBD pro vysokorychlostní obrábění hliníkových slitin. Rovněž byly stanoveny s ohledem na daný materiál, stroj a s ohledem na zvolený druh obrábění. Pro frézování bylo využito čelní frézování rovinné plochy se symetrickým uspořádáním. Za oblast vysokorychlostního frézování se považuje řezná rychlost nad  $800 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$  [48]. Hodnoty zvolených řezných podmínek jsou shrnuty v tab. 3.3

Tabulka 3.3: Řezné podmínky použité v daných testech.

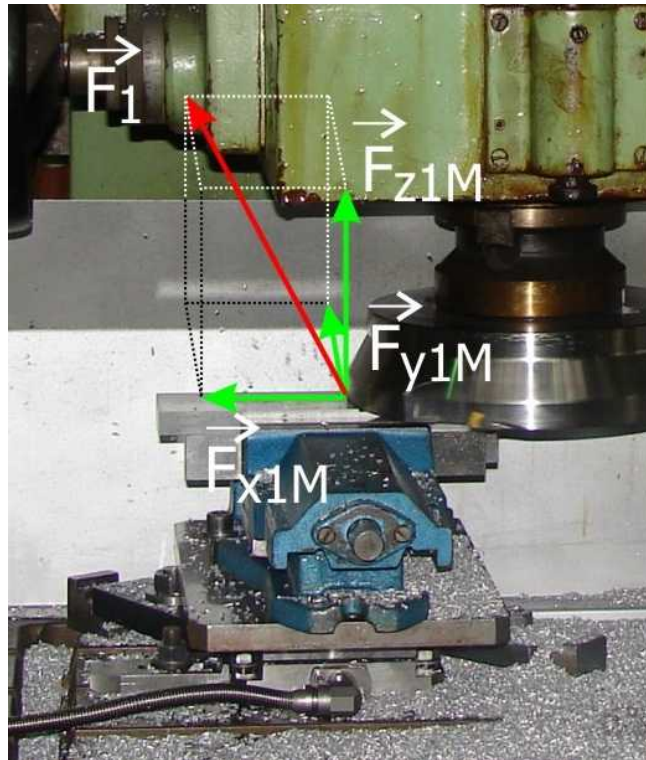
Veličina	označení	hodnota	jednotka
řezná rychlost	$v_c$	1100	$\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$
otáčky	$n$	1400	$\text{min}^{-1}$
posuvová rychlost	$v_f$	250	$\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$
šířka záběru ostří	$a_p$	2	mm
chlazení/mazání	NE		
druh frézování	symetrické čelní frézování - jednostranné		
kriterium opotřebení	pevný čas obrábění (16 minut)		

#### 3.2.3. Způsob snímání zatížení nástroje, metodika měření

Pro měření axiální, radiální a tangenciální síly byl použit piezoelektrický dynamometr KISTLER 9257B s nábojovým zesilovačem 5070A. Vzorkovací frekvence byla nastavena na 7000Hz, přičemž byla nastavena dlouhá vybíjecí konstanta a dolnoproustný filtr na hladině 50Hz. Pomocí této aparatury bylo možné získat základní zdrojové signály silového zatížení v osách X, Y, Z. Předběžným měřením bylo zjištěno, že zatížení ve směru osy vřetene bylo poměrně nízké (v rozsahu cca 5 - 10%) ve srovnání s dominantní silovou



### 3. TESTOVÁNÍ NÁSTROJŮ PRO SPECIFICKÉ PODMÍNKY OBRÁBĚNÍ



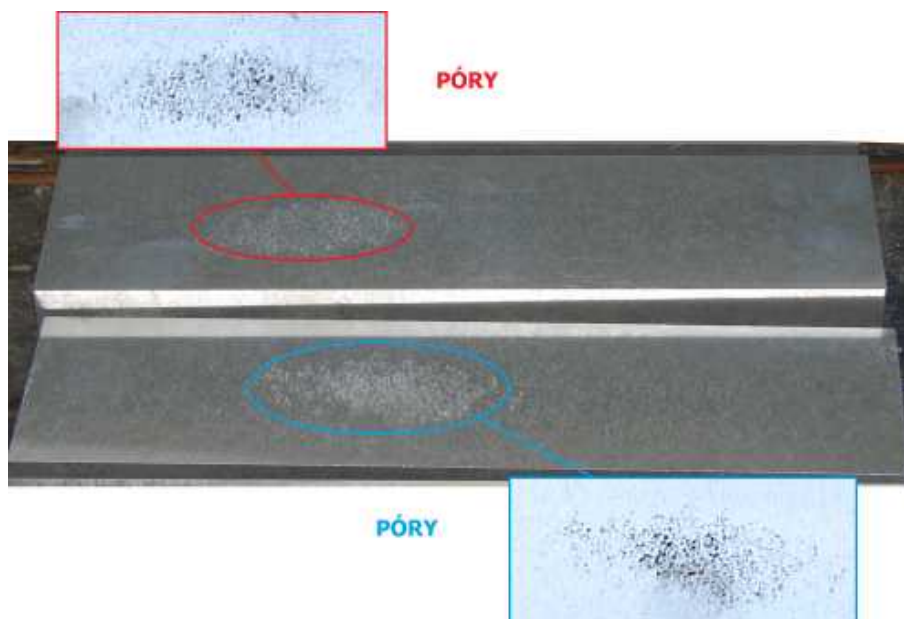
Obrázek 3.5: Znázornění silového zatížení vzhledem k nástroji (měřené složky silového zatížení mají opačnou orientaci).

složkou  $F_c$ ). Zpracování složek silového zatížení bylo tedy zaměřeno zejména na složky působící ve směru os stroje x a y ( $F_{x1M}$  a  $F_{y1M}$ ) (viz obr. 3.5).

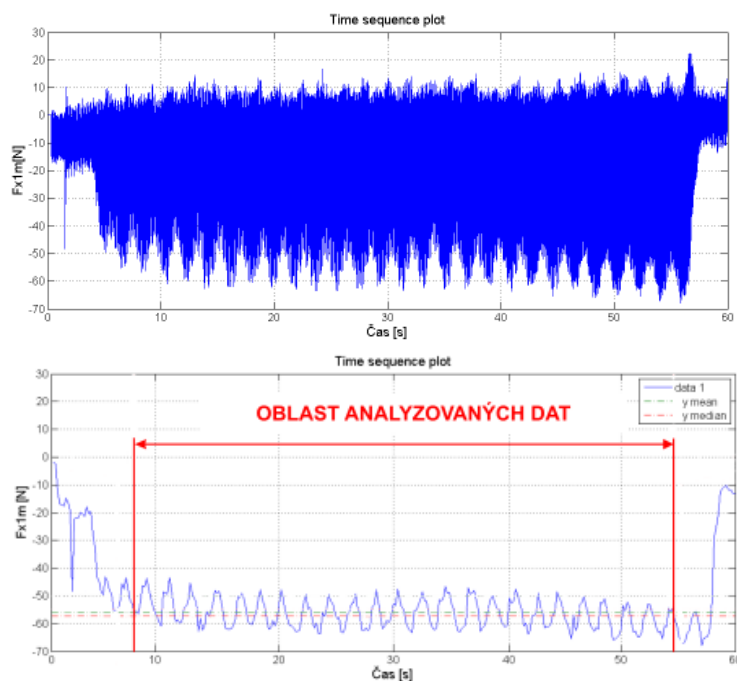
V průběhu všech měření byl v záběru vždy pouze jeden břit frézy (veškeré testování bylo provedeno pouze s jednou upnutou VBD). Základní zdrojové hodnoty měřených sil (viz obr. 3.7 až obr. 3.9) bylo nutno dále filtrovat s ohledem na maximální průřez třísky. K tomuto účelu byl vytvořen speciální filtrovací skript pro program matlab vyhledávající maximální velikost výslednice sil pro dílčí měřené složky a příslušné časové indexy měření. Ze získaných hodnot byly separovány intervaly oddělené od náběhových a výběhových částí a tyto hodnoty byly dále statisticky zpracovávány.

Z důvodu nehomogenity a vysokému stupni pórovitosti obráběného materiálu (viz obr. 3.6) byly pozorovány výchyly v měřeném silovém zatížení (viz obr. 3.8, 3.9). Tyto výchyly měly negativní vliv na rozdělení hodnot pro následné statistické zpracování (viz testy normálního rozdělení obr. 3.10). Protože nebylo z tohoto důvodu možné použít bodové odhady středních hodnot, byly využívány neparametrické testy hypotéz a bylo pracováno s mediány hodnot silového zatížení.

### 3.2. TESTOVÁNÍ NÁSTROJE PRO ROVINNÉ HSC OBRÁBĚNÍ AL SLITINY

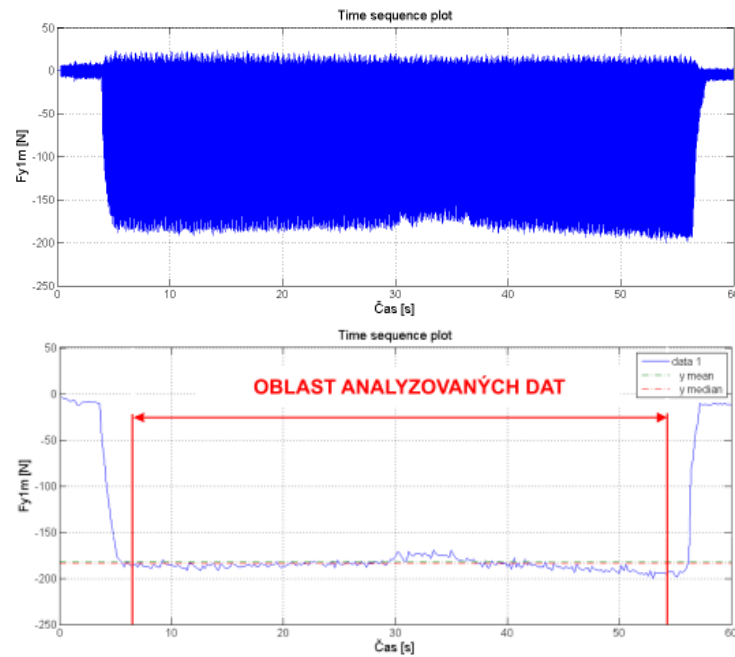


Obrázek 3.6: Znázornění pórovitých oblastí v obráběném materiálu pro měřené průjezdy.

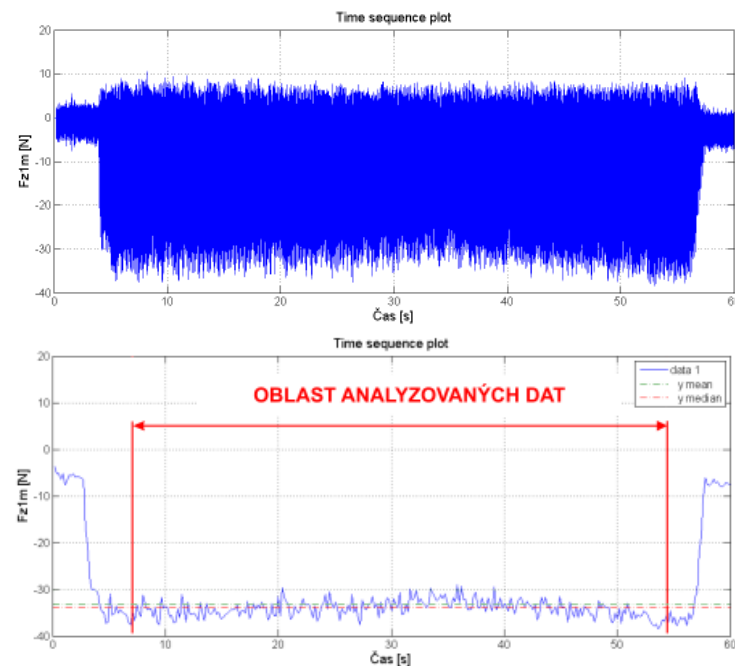


Obrázek 3.7: Ukázka obvyklých naměřených silových dat (nahore) a jejich numerická filtrace (dole) pro měřenou silovou složku v ose x.

### 3. TESTOVÁNÍ NÁSTROJŮ PRO SPECIFICKÉ PODMÍNKY OBRÁBĚNÍ



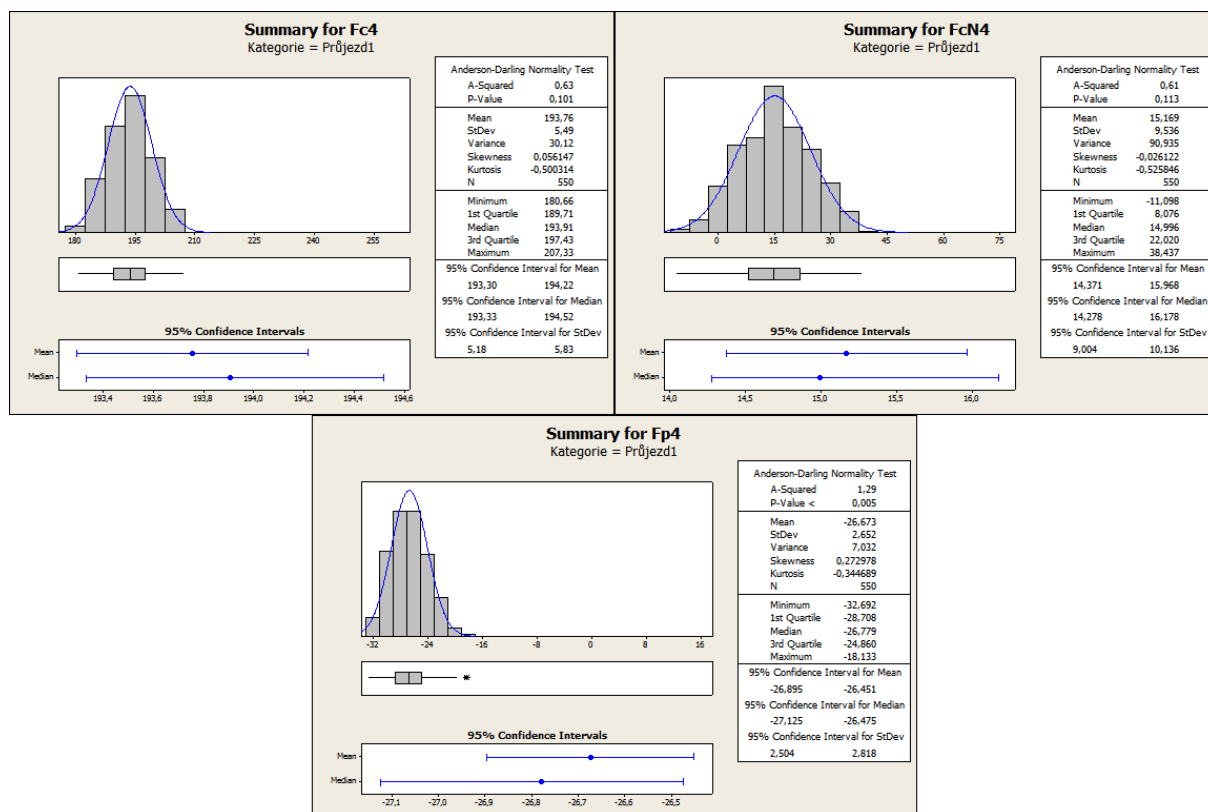
Obrázek 3.8: Ukázka obvyklých naměřených silových dat (nahore) a jejich numerická filtrace (dole) pro měřenou silovou složku v ose y.



Obrázek 3.9: Ukázka obvyklých naměřených silových dat (nahore) a jejich numerická filtrace (dole) pro měřenou silovou složku v ose z.

Maximální průřez třísky byl vyšetřován pomocí speciálního numerického programu. Na obr. 3.7 až 3.9 jsou znázorněny výsledky statistických vyhodnocení a pásma naměřených hodnot jsou nahrazeny pouhými body - znázorňujícími mediány, za podmínky stabilizovaného průběhu obrábění. Každý diagram je složen z řady bodů, přičemž pro každý

### 3.2. TESTOVÁNÍ NÁSTROJE PRO ROVINNÉ HSC OBRÁBĚNÍ AL SLITINY



Obrázek 3.10: Ukázka statistického zpracování naměřených a filtrovaných dat - histogramy normálního rozdělení - hodnoty udávají bodový odhad střední hodnoty řezné, normálové řezné a pasivní síly a jejich směrodatné odchylky.

bod bylo provedeno statistické vyhodnocení. Takto získané hodnoty byly dále použity pro další silové analýzy a v práci je uvedeno základní měření a vyhodnocení silových složek pomocí:

- zdrojové filtrované hodnoty z měřicího zařízení,

popisují základní měřené veličiny ve třech osách v integrálním tvaru. V případě, že síly nemají ustálený charakter dochází k rychlému opotřebení nástrojů, přičemž není možné analyzovat hodnoty pomocí výše popsaného postupu, ale je dále provedena analýza trendu, která je dále párově posuzována.

- silového rozkladu zatížení nástroje dle ČSN ISO 3002,

jedná se o určující silový rozklad pro technologickou analýzu namáhání nástroje, tj. určení složky řezné síly  $F_c$ , normálové řezné síly  $F_{cN}$ , pasivní síly  $F_p$  a výsledné síly  $F$  (výslednice).

- výpočtu měrných veličin obrábění (dle ČSN ISO 3002),

představujících parametry analogické se základními fyzikálními vlastnostmi obráběného materiálu. Jsou odvozeny ze silové analýzy dle ČSN ISO 3002 a v případě řezného výkonu postihují i účinek řezné rychlosti. Tyto ukazatele určují energetickou náročnost obrábění

### 3. TESTOVÁNÍ NÁSTROJŮ PRO SPECIFICKÉ PODMÍNKY OBRÁBĚNÍ

a nepřímo i stav opotřebení nástroje. Překročení limitních hodnot má obvykle za následek lom břitu, či destrukci nástroje.

Průběžné měření řezných sil umožňuje sledování časového rozvoje opotřebení, které reflektuje způsob a intenzitu rozvoje opotřebení rozvoje dílčích forem opotřebení a to bez potřeby přerušování obrábění za účelem měření. Rovněž napomáhá snižovat touto cestou rizika spojená s demontáží frézy, odstranění nárůstků s možností přídatného poškození, měření a následných chyb spojených s ustavováním nástroje.

Fotodokumentace opotřebení byla prováděna před započítím testů a po dokončení testů. Ze snímků je možné odhadnout formu opotřebení a jejich přibližnou velikost, nicméně samotné měření parametrů opotřebení (dle ČSN ISO 8688-2) nebylo prováděno zejména z důvodu nerovnoměrného rozvoje fazet opotřebení na hlavním hřbetu, vedlejším hřbetu a na čelní ploše (vedlo by ke značnému časovému prodloužení zkoušek, měření a vyhodnocování).

#### 3.2.4. Příprava experimentu

V průběhu testování byly použity řezné podmínky uvedené v kapitole 3.2.2. Testování bylo koncipováno a provedeno dle následující metodiky měření:

- střídání měřených a neměřených průjezdů (měřeným průjezdem je míněno měření silového zatížení pomocí aparatury Kistler) systémem (1 měřený/3 neměřené) za účelem rychlejšího rozvoje opotřebení nástroje,
- uspořádání experimentu je znázorněno na obr.3.11 (vlevo - strojní svěrák s obrobkem pro měřené průjezdy o délce 240 mm , vpravo - materiál upnutý ve dvou strojních svěracích pro neměřené průjezdy o délce 570 mm).

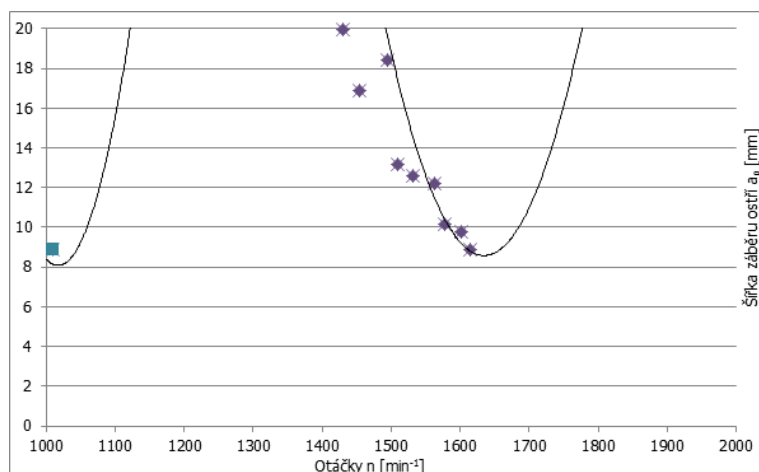


Obrázek 3.11: Uspořádání experimentu.

### 3.2. TESTOVÁNÍ NÁSTROJE PRO ROVINNÉ HSC OBRÁBĚNÍ AL SLITINY

#### Dynamická stabilita procesu

Stabilita procesu obrábění hraje významnou roli jak pro trvanlivost nástrojů, tak i pro výslednou kvalitu obrobených ploch. Vzhledem k použití vysoké řezné rychlosti bylo přistoupeno k analýze stability obrábění a za účelem prevence vzniku samobuzených vibrací byla provedena analýza stability obrábění pomocí aparatury Brüel & Kjær. Výsledky této analýzy je možné vidět v diagramu stability na obr. 3.12, který znázorňuje oblasti nestability. V pásmu zvolených otáček nejsou žádné křivky nestability - tzv. lobby.



Obrázek 3.12: Diagram stability.

#### 3.2.5. Analýza naměřených experimentálních dat

V této části práce byly vyhodnoceny VBD z produkce Pramet Tools, s.r.o ze slinutého karbidu (HF 7), opatřených povlaky popsanych v tab. 3.1.

Použití VBD s PVD povlaky vedlo ke snížení potřebného řezného výkonu na začátku obrábění o 1-30% ve srovnání s VBD nepovlakovanou (viz obr. 3.14). Rozdíl v řezném výkonu mezi nástroji opatřenými povlaky a nástrojem bez povlaku se při dalších měřených průjezdech snižoval (viz obr. 3.14), přičemž bylo pozorováno kolísání složek silového zatížení, které dalo vzniknout předpokladu vzniku adheznímu přilnutí materiálu na břit nástroje. Z tabulky 3.4 a grafů znázorňujících jednotlivé složky silového zatížení a jejich průběh v čase je zřejmý strmý nárůst silového zatížení v jednotlivých měřených průjezdech, zejména při řezivostní zkoušce nástroje s povlakem Darwin. Tato skutečnost je dána chemickým složením povlaku (velmi hladký povlak AlTiN s vysokým obsahem Al) a materiálu obrobku, z čehož vyplývá vysoký stupeň afinity obou materiálů. Kombinace těchto faktorů spojených s vysokou teplotou při obrábění činí povlak nevhodným pro zvolený druh obrábění. V tabulce 3.4 je dokumentována velikost silového zatížení v závislosti na době nástroje v řezu, přičemž jejich velikost je mediánem naměřených hodnot. Objem odebraného materiálu mezi jednotlivými měřenými průjezdy byl roven 3531 cm<sup>3</sup> materiálu. U filtrovaných hodnot silového zatížení byla nejprve testována hypotéza, zda tyto hodnoty podléhají normálnímu rozdělení. Veškeré statistické analýzy byly provedeny v



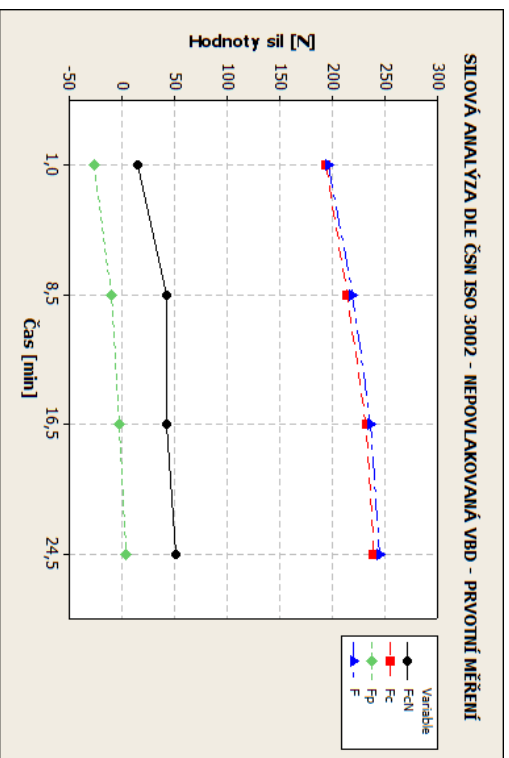
### 3. TESTOVÁNÍ NÁSTROJŮ PRO SPECIFICKÉ PODMÍNKY OBRÁBĚNÍ

Tabulka 3.4: Mediány zatížení charakteristických měřených a vypočítaných veličin - výchozí geometrie frézovací hlavy.

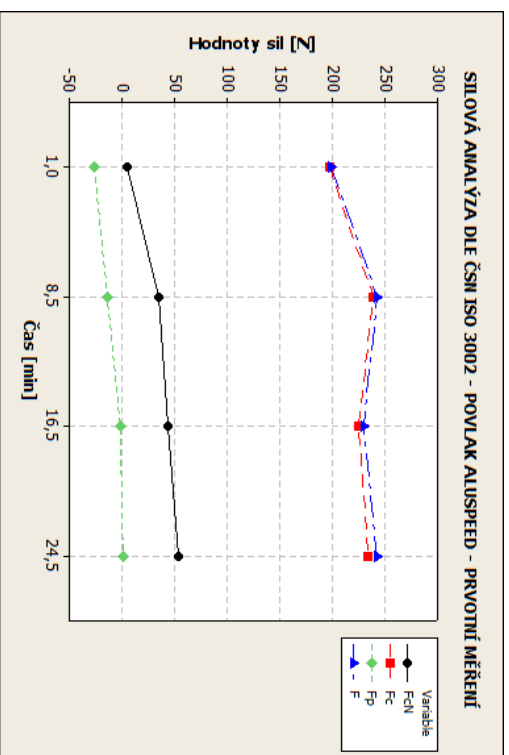
Typ povlaku	Čas obrábění T [min]	Řezná síla $F_c$ [N]	Normálová řezná síla $F_{cN}$ [N]	Pasivní síla $F_p$ [N]	Měrná řezná síla $k_c$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Řezný výkon $P_c$ [kW]
Bez povlaku	1,0	193,907	14,996	-26,779	543,155	3,555
	8,5	214,072	42,603	-9,845	599,640	3,925
	16,5	231,941	42,211	-2,635	649,695	4,252
	24,5	239,345	50,713	3,946	670,434	4,388
AluSpeed	1,0	197,390	-0,314	-28,266	552,913	3,619
	8,5	238,822	28,781	-16,000	668,968	4,378
	16,5	225,063	38,482	-4,109	630,427	4,126
	24,5	234,070	48,302	-2,218	655,657	4,291
Darwin	1,0	131,699	5,549	-26,345	368,905	2,414
	8,5	221,372	34,604	-13,762	620,090	4,058
	16,5	245,521	43,296	-1,730	687,734	4,501
	24,5	245,410	53,322	0,882	687,423	4,499
Tripple Alwin	1,0	202,220	19,827	-22,203	566,441	3,707
	8,5	199,264	46,413	-4,902	558,161	3,653
	16,5	206,911	52,159	3,878	579,583	3,793
	24,5	218,503	80,277	9,715	612,053	4,006

softwaru Minitab, přičemž testovaná hypotéza o normalitě dat byla zamítnuta na hladině významnosti  $\alpha = 0,05$ . Zamítnutí nulové hypotézy o normalitě dat je přisuzováno zejména nízké kvalitě obráběného polotovaru (viz obr. 3.4 a obr. 3.6), která se projevila vysokým rozptylem hodnot silového zatížení (až 10%). Proto bylo přistoupeno k neparametrickým testům hypotéz, konkrétně testu Kruskal-Wallis, u kterého byla testována hypotéza o rozdělení naměřených hodnot. U všech naměřených hodnot byla hodnota  $p \gg 0,05$ , proto se nezamítá nulová hypotéza a je možné skupinu naměřených hodnot popsat hodnotou mediánu. Provedené analýzy jsou součástí přiloženého DVD a je možné nalézt v souboru VYCHOZI\_GEOMETRIE.MPJ. Ostatní podstatné statistické ukazatele, jakými je minimální, maximální hodnota, horní a dolní kvantil a další jsou uvedeny v tabulkách v příloze II-5.

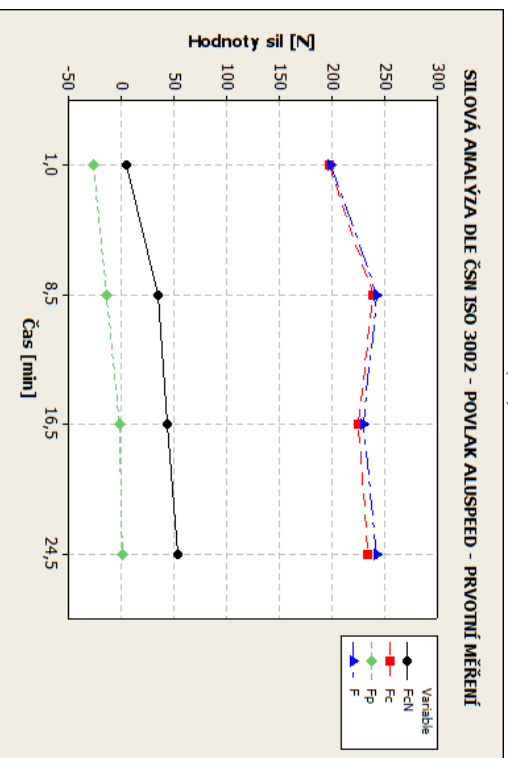
### 3.2. TESTOVÁNÍ NÁSTROJE PRO ROVINNÉ HSC OBRÁBĚNÍ AL SLITINY



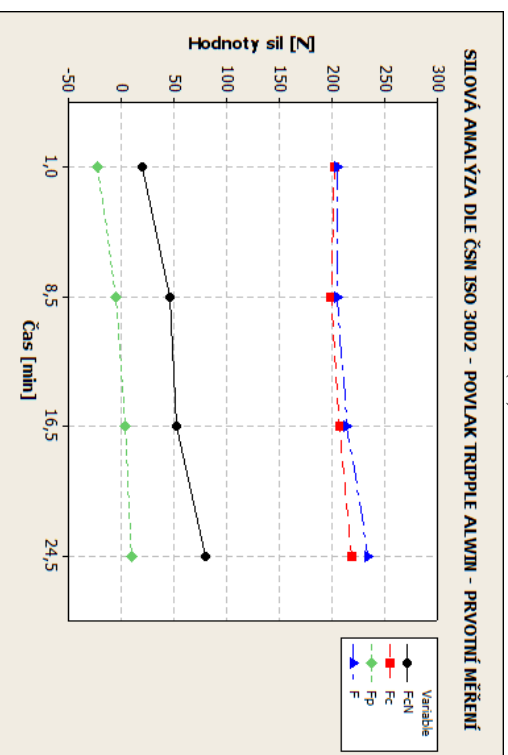
(A)



(B)



(C)

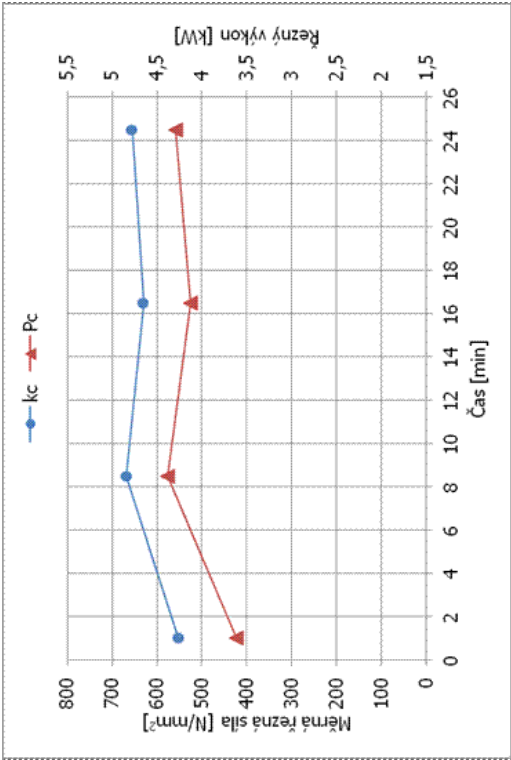


(D)

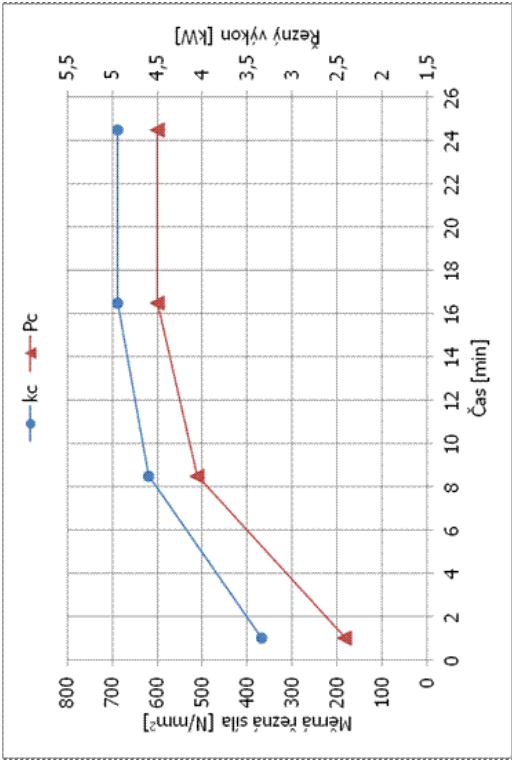
Obrázek 3.13: Analýza řezivosti VBD Pramet Tools, s.r.o. -  $v_c = 1100 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ , symetrické čelní frézování, silová analýza - mediány zatížení.



3. TESTOVÁNÍ NÁSTROJŮ PRO SPECIFICKÉ PODMÍNKY OBRÁBĚNÍ



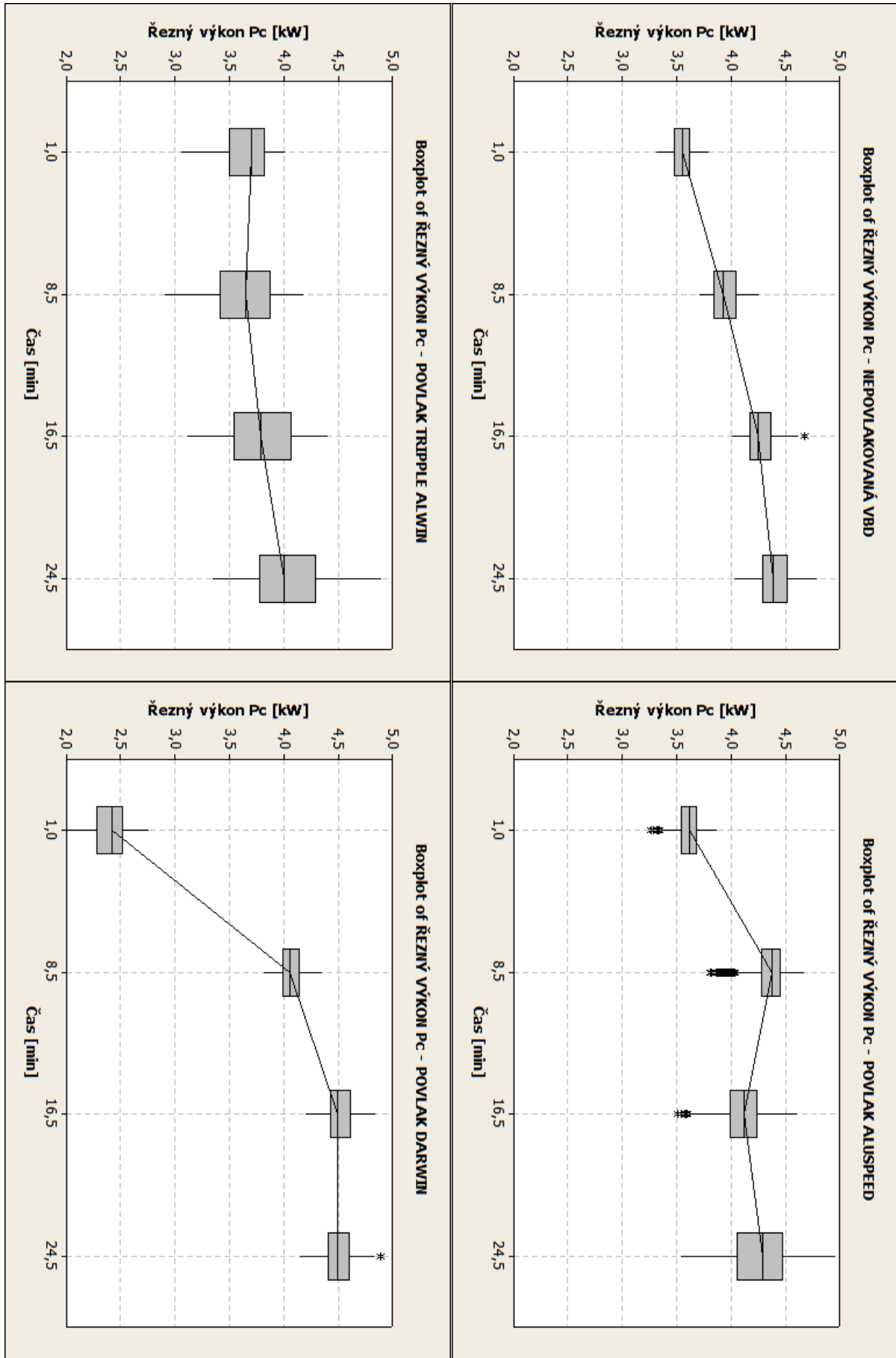
(A) Bez povlaku



(B) AluSpeed

Obrázek 3.14: Analýza řezivosti VBD Pramet Tools, s.r.o. -  $v_c = 1100m.min^{-1}$ , symetrické čelní frézování, mediány - měrná řezná síla - řezný výkon.

3.2. TESTOVÁNÍ NÁSTROJE PRO ROVINNÉ HSC OBRÁBĚNÍ AL SLITINY



Obrázek 3.15: Krabicové diagramy energetické náročnosti jednotlivých posuzovaných nástrojů v závislosti na objemu odebraného materiálu.

### 3. TESTOVÁNÍ NÁSTROJŮ PRO SPECIFICKÉ PODMÍNKY OBRÁBĚNÍ

Mezi prvním a druhým měřeným průjezdem je znatelný rozdíl hodnot silového zatížení mezi většinou posuzovaných povlaků. Nejvíce znatelný je tento rozdíl u nástroje s povlakem Darwin (viz obr. 3.13 až obr. 3.15). Tato skutečnost byla přisuzována příliš nízké zvolené intenzitě měřených průjezdů, proto bylo provedeno doměření silového zatížení v časovém intervalu od 0 do 14 minut doby nástroje v řezu.

Doplňující měření bylo koncipováno a provedeno dle následující metodiky měření:

- provedení obráběcích zkoušek pouze měřených bez použití obrábění neměřeného polotovaru pro rychlejší rozvoj opotřebení ,
- uspořádání experimentu je znázorněno na obr. 3.11, přičemž byl využíván pouze strojní svěrák s obrobkem pro měřené průjezdy o délce 240 mm,

Doměřené hodnoty silového zatížení je možné pozorovat v grafech na obr. 3.16 až obr. 3.18, přičemž je z naměřených hodnot rozlišitelné kolísání hodnot silového zatížení. Z tabulky 3.5 a grafů znázorňujících jednotlivé složky silového zatížení a jejich průběh v čase, je zřejmé kolísání hodnot silového zatížení v jednotlivých měřených průjezdech. V tabulce je dokumentována velikost silového zatížení v závislosti na době nástroje v řezu, přičemž jejich velikost je opět mediánem naměřených hodnot. Hypotéza testující normalitu naměřených hodnot a další statistické zpracování bylo provedeno opět pomocí softwaru Minitab. Detaily analýz je možné nalézt na přiloženém DVD v souboru VYCHOZI\_GEOMETRIE.MPJ. Ostatní podstatné statistické ukazatele, jakými je minimální, maximální hodnota, horní a dolní kvantil a další jsou uvedeny v tabulkách v příloze II-7.

### 3.2. TESTOVÁNÍ NÁSTROJE PRO ROVINNÉ HSC OBRÁBĚNÍ AL SLITINY

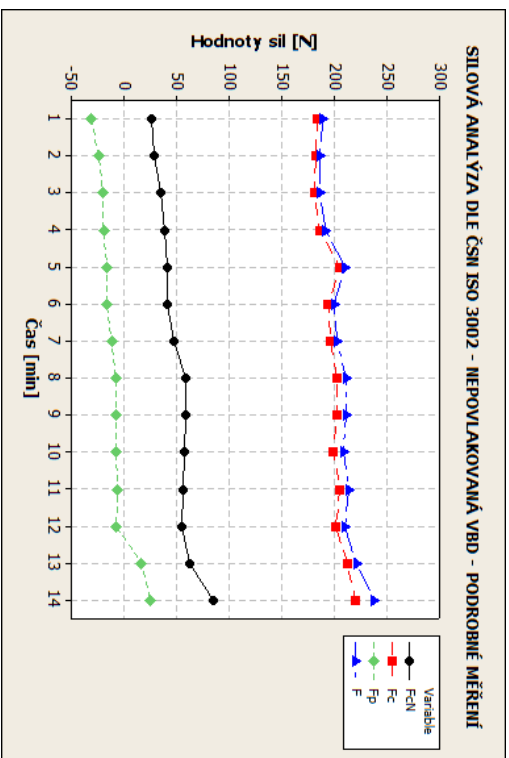
Tabulka 3.5: Mediány zatížení charakteristických měřených a dopočítaných veličin - výchozí geometrie frézovací hlavy - doměřené hodnoty.

Typ povlaku	Čas obrábění T [min]	Řezná síla $F_c$ [N]	Normálová řezná síla $F_{cN}$ [N]	Pasivní síla $F_p$ [N]	Měrná řezná síla $k_c$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Řezný výkon $P_c$ [kW]
Bez povlaku	1	183,691	26,678	-31,296	514,541	3,368
	2	182,104	28,386	-23,607	510,094	3,339
	3	181,233	34,551	-20,173	507,655	3,323
	4	185,665	39,005	-19,249	520,069	3,404
	5	205,290	40,958	-16,304	575,042	3,764
	6	194,156	41,864	-16,588	543,854	3,560
	7	196,585	47,257	-11,823	550,658	3,604
	8	202,377	58,813	-7,488	566,882	3,710
	9	202,377	58,848	-7,494	566,882	3,710
	10	199,134	57,726	-7,948	557,798	3,651
	11	205,563	56,435	-5,805	575,807	3,769
	12	201,307	55,593	-7,421	563,884	3,691
	13	212,055	62,516	16,757	593,992	3,888
	14	220,600	85,000	25,250	617,927	4,044
AluSpeed	1	180,984	30,508	-3,872	506,957	3,318
	2	192,209	50,268	3,863	538,399	3,524
	3	202,111	52,365	7,914	566,136	3,705
	4	201,146	57,363	17,405	563,434	3,688
	5	211,199	62,330	25,405	591,594	3,872
	6	200,745	46,029	14,374	562,311	3,680
	7	216,874	50,292	24,346	607,489	3,976
	8	207,839	48,585	15,054	582,182	3,810
	9	222,941	61,078	21,608	624,483	4,087
	10	221,884	59,769	25,341	621,522	4,068
	11	209,287	55,162	11,680	586,237	3,837
	12	213,012	65,562	19,954	596,672	3,905
	13	209,541	64,407	15,193	586,948	3,842
	14	212,055	62,988	16,640	593,992	3,888

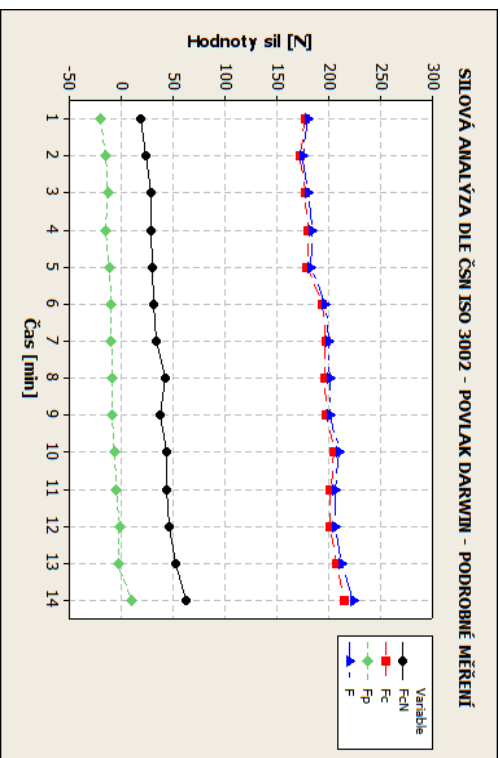
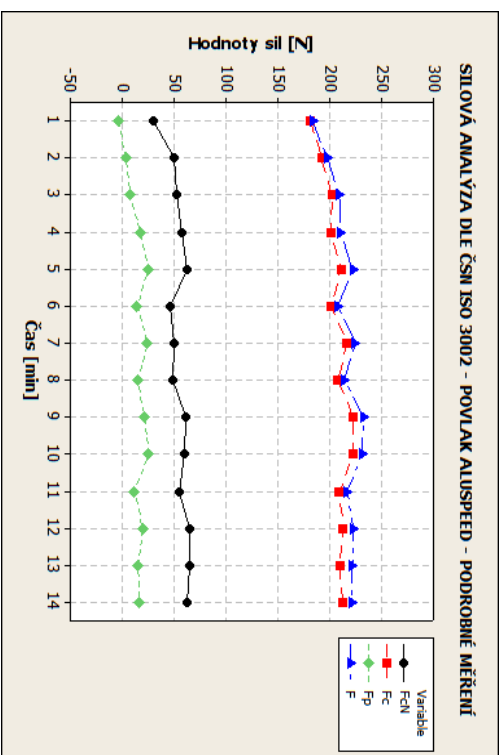
### 3. TESTOVÁNÍ NÁSTROJŮ PRO SPECIFICKÉ PODMÍNKY OBRÁBĚNÍ

Darwin	1	177,246	19,304	-20,362	496,487	3,250
	2	172,444	23,573	-14,768	483,035	3,161
	3	177,280	28,359	-13,014	496,583	3,250
	4	180,428	28,651	-15,180	505,401	3,308
	5	179,331	30,404	-11,630	502,326	3,288
	6	194,085	30,682	-9,392	543,654	3,558
	7	196,989	33,863	-9,464	551,789	3,611
	8	196,183	42,885	-8,760	549,531	3,597
	9	197,376	38,084	-8,660	552,874	3,619
	10	205,502	43,588	-6,514	575,634	3,768
	11	201,666	43,592	-4,781	564,889	3,697
	12	201,100	46,445	-1,628	563,305	3,687
	13	207,321	52,327	-2,958	580,731	3,801
	14	214,768	62,866	9,659	601,590	3,937
Tripple Alwin	1	177,293	29,271	-21,459	496,618	3,250
	2	177,769	31,638	-15,338	497,952	3,259
	3	179,996	34,867	-12,733	504,189	3,300
	4	190,473	40,023	-7,253	533,538	3,492
	5	195,443	45,036	-12,265	547,458	3,583
	6	200,117	48,035	-8,647	560,552	3,669
	7	208,599	49,612	-6,366	584,311	3,824
	8	200,330	54,260	-4,856	561,148	3,673
	9	199,948	51,683	-6,667	560,078	3,666
	10	216,367	62,973	-4,187	606,069	3,967
	11	209,341	57,783	-3,608	586,388	3,838
	12	202,922	54,785	-4,571	568,409	3,720
	13	213,282	60,038	-2,642	597,429	3,910
	14	210,213	55,794	-2,796	588,831	3,854

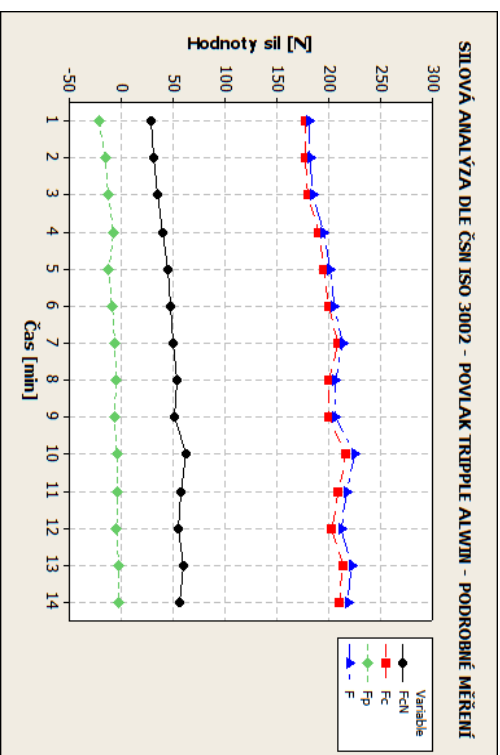
### 3.2. TESTOVÁNÍ NÁSTROJE PRO ROVINNÉ HSC OBRÁBĚNÍ AL SLITINY



(A)



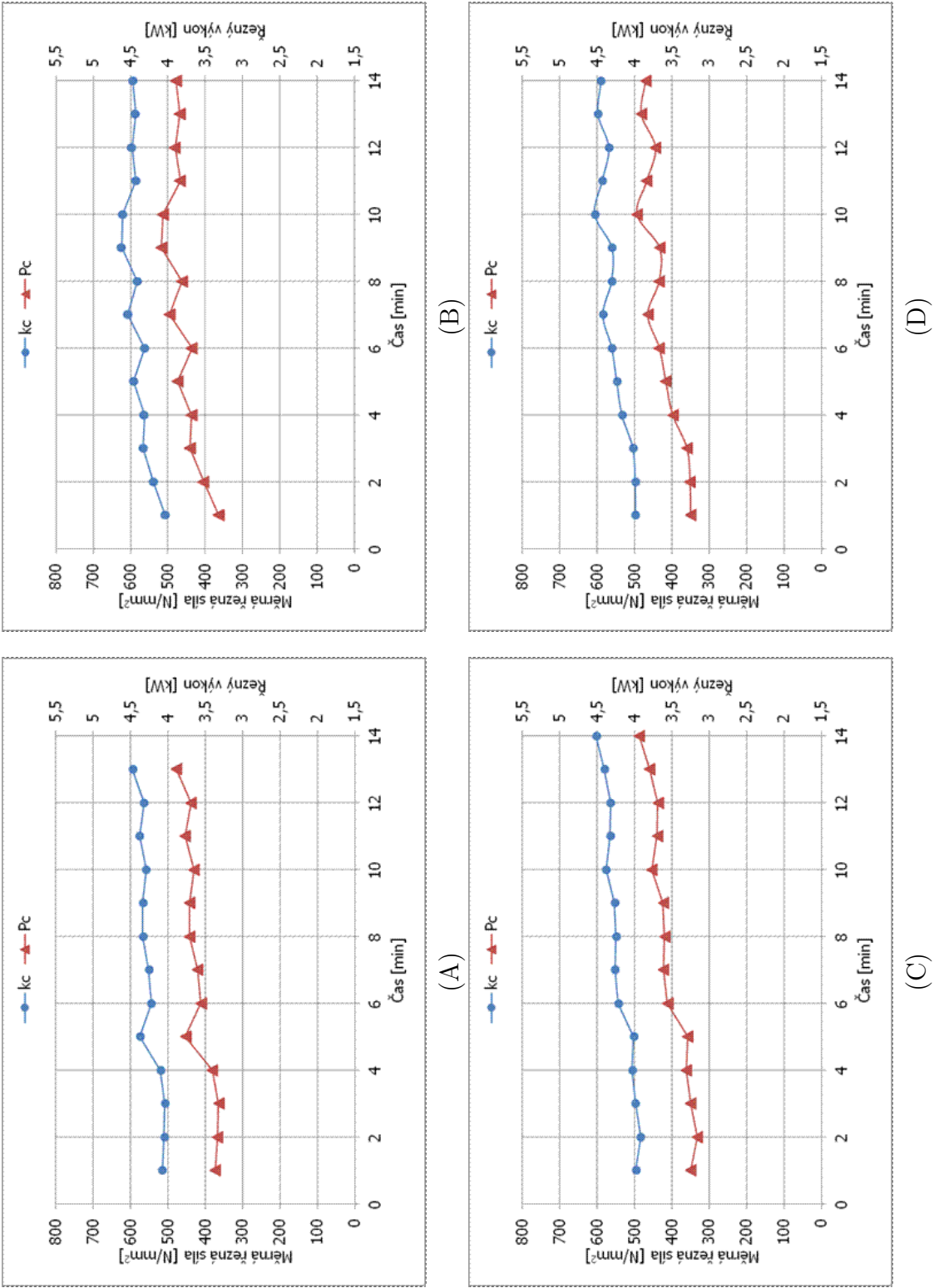
(C)



(D)

Obrázek 3.16: Analýza řezivosti VBD Pramet Tools, s.r.o. -  $v_c = 1100 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ , symetrické čelní frézování - doměřený interval hodnot - silová analýza - mediány zatížení.

3. TESTOVÁNÍ NÁSTROJŮ PRO SPECIFICKÉ PODMÍNKY OBRÁBĚNÍ



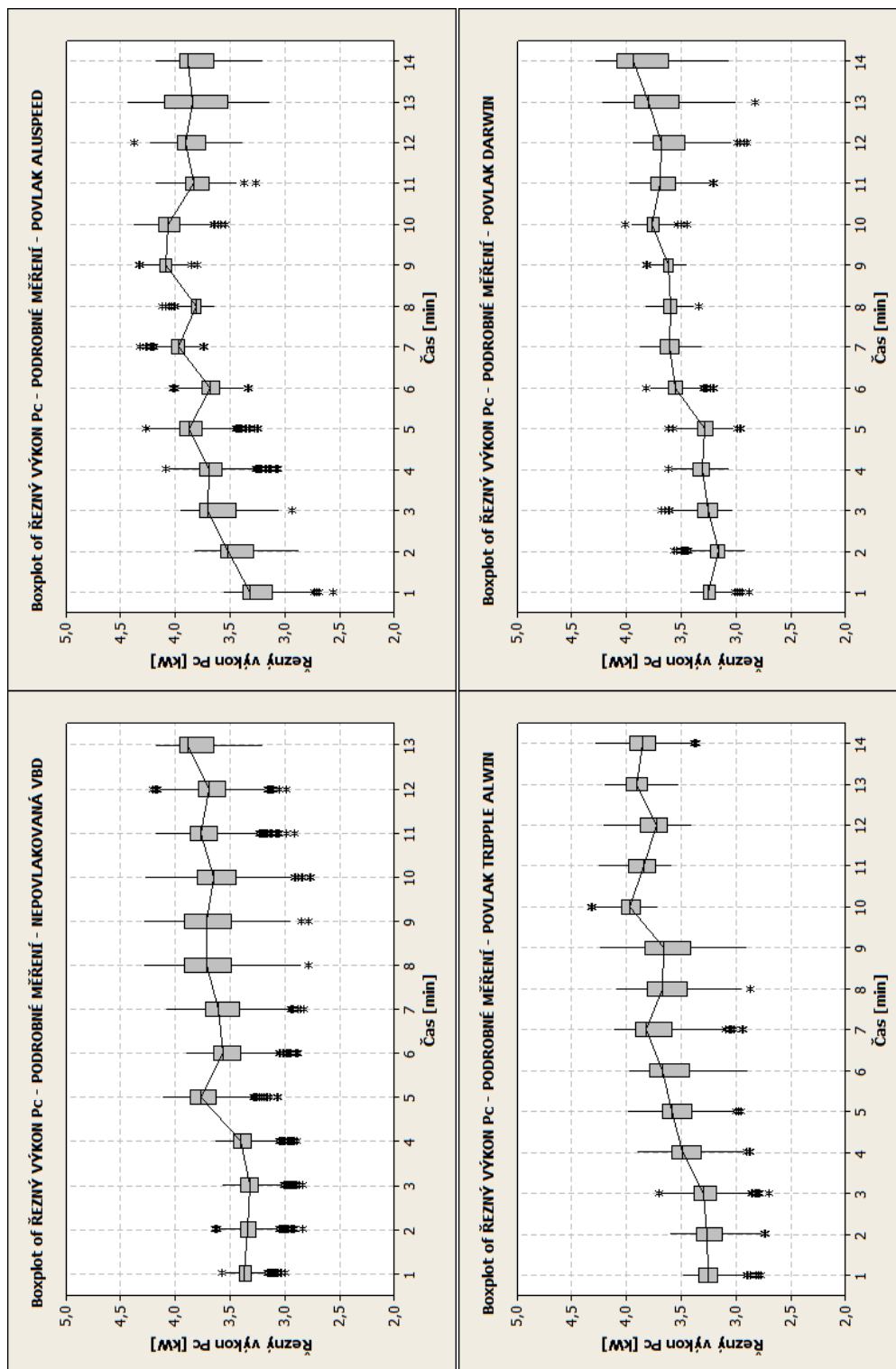
Obrázek 3.17: Analýza řezivosti VBD Pramet Tools, s.r.o. -  $v_c = 1100\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$ , symetrické čelní frézování - doměřený interval hodnot; mediány - měrná řezná síla - řezný výkon.

### *3.2. TESTOVÁNÍ NÁSTROJE PRO ROVINNÉ HSC OBRÁBĚNÍ AL SLITINY*

Z průběhů silového zatížení doměřených hodnot je možné vypořizovat nestabilitu, s vysokým počtem tzv. „outliers” (odlehých hodnot). Tato nestabilita se obvykle projevuje při vzniku nárůsku a jeho následném oddělení od břitu nástroje. Aby bylo možné ověřit tento předpoklad byla provedena analýza opotřebení nástrojů.



### 3. TESTOVÁNÍ NÁSTROJŮ PRO SPECIFICKÉ PODMÍNKY OBRÁBĚNÍ

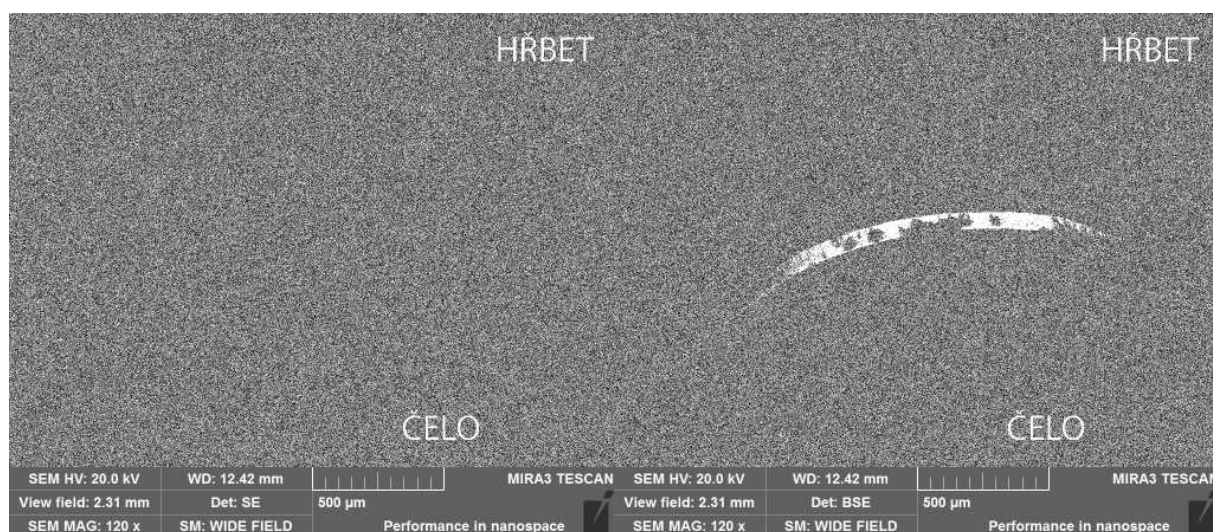


Obrázek 3.18: Krabicové diagramy energetické náročnosti jednotlivých posuzovaných nástrojů v závislosti na trvanlivosti nástroje.

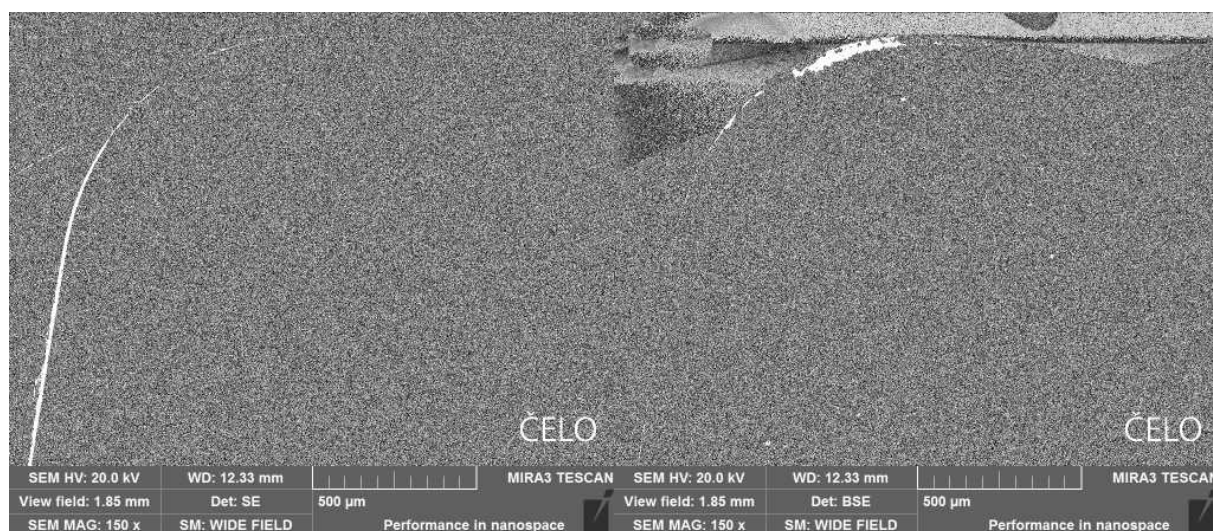
#### 3.2.6. Rozbor opotřebení nástrojů

##### Analýza stavu nástrojů po řezné zkoušce

Zkoumáním vyměnitelných břitových destiček byl potvrzen předpoklad o vzniku nárůstků na břitu nástroje (viz obr. 3.19). Na snímcích z elektronového mikroskopu promítnutého ve zpětných elektronech (BSE) je znatelná fazetka opotřebení v důsledku abraze, přičemž na hřbetní ploše je jednoznačně rozpoznatelný přilnutý materiál (stav vyměnitelných břitových destiček po 14 minutách obrábění - podrobné měření - povlak AluSpeed). Na snímcích čelní plochy (obr. 3.20) jsou vidět části přilnutého materiálu v důsledku adheze a jsou zde velmi dobře rozpoznatelné znaky abrazního otěru na čele nástroje v kontaktním místě mezi třískou a čelem nástroje, který měl za následek úplné odkrytí podkladového slinutého karbidu.



Obrázek 3.19: Hřbetní plocha nástroje po řezných zkouškách - VBD s povlakem AluSpeed



Obrázek 3.20: Čelní plocha nástroje po řezných zkouškách - VBD s povlakem Aluspeed

### 3. TESTOVÁNÍ NÁSTROJŮ PRO SPECIFICKÉ PODMÍNKY OBRÁBĚNÍ

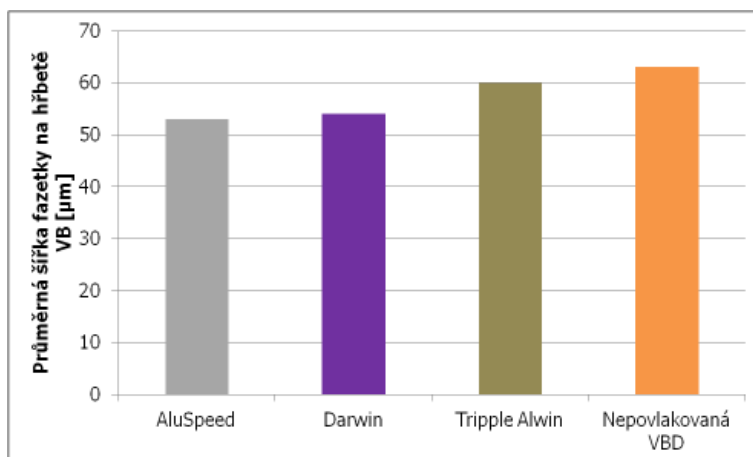
Na obr.3.21 je možné pozorovat zaoblení ostří, jako běžný průvodní jev abrazního opotřebení v důsledku obrábění materiálu s vysokým obsahem křemíku. V tabulce 3.6 je přehled šířky fazetky opotřebení po 14 minutách obrábění. Kompletní snímková dokumentace opotřebení je uvedena v příloze II-4 pro výchozí geometrii - prvotní měření a v příloze II-6 pro doměřený interval hodnot.



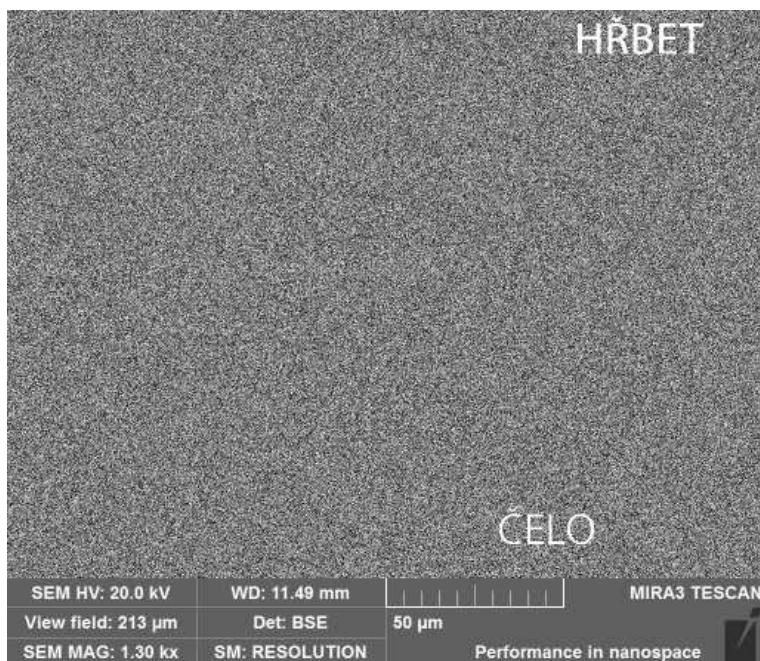
### 3.2. TESTOVÁNÍ NÁSTROJE PRO ROVINNÉ HSC OBRÁBĚNÍ AL SLITINY

Tabulka 3.6: Průměrná šířka fazetky hřbetního opotřebení v kontaktní délce u jednotlivých testovaných VBD - podrobné měření.

Testovaný nástroj	průměrná šířka fazetky na hřbetě VB [ $\mu\text{m}$ ]
AluSpeed	53
Darwin	54
Tripple Alwin	60
Nepovlakovaná VBD	63



Obrázek 3.22: Srovnání průměrné šířky fazetky hřbetního opotřebení v kontaktní délce u jednotlivých testovaných VBD - podrobné měření.

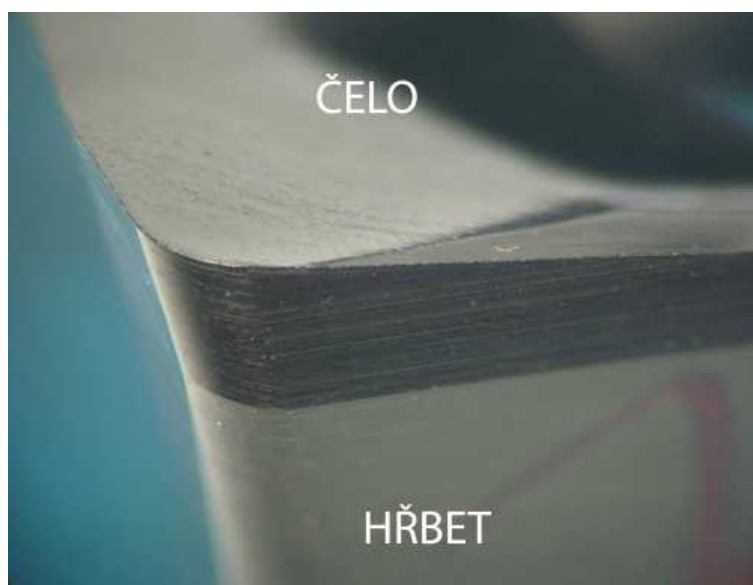


Obrázek 3.21: Detail ostří - VBD s povlakem AluSpeed, vlevo detail hřbetní plochy

### 3.2.7. Dílčí závěry a doporučení

Zkoumáním vyměnitelných břitových destiček před experimentálními testy bylo zjištěno:

- způsob broušení hřbetních ploch může způsobovat vznik nárůstku na hřbetní ploše (viz obr. 3.23),
- nebyly pozorovány povrchové vady povlaku na žádné z posuzovaných VBD a všechny povlaky měly kompaktní vzhled.



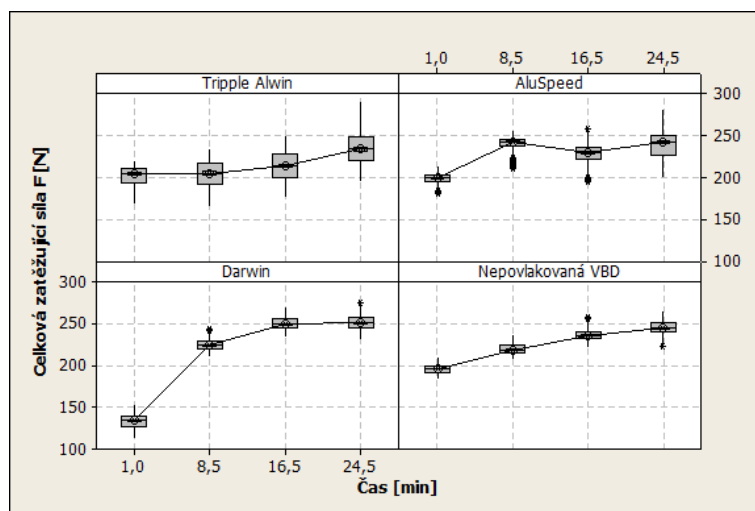
Obrázek 3.23: Detail broušení hřbetní plochy.

**Analýza silového zatížení, opotřebení a rozbor energetické náročnosti prokázaly:**

- dominantním vlivem způsobujícím opotřebení při obrábění AISi9Cu3(Fe) je abrazivní opotřebení,
- u všech VBD byl pozorován adhezně přilnutý materiál na čele VBD a to v kontaktní oblasti čelo - tříska (viz obrazová dokumentace v příloze II-4, II-6 - čelo),
- statisticky významný rozdíl mediánu řezných sil na hladině významnosti  $\alpha = 0,05$  mezi všemi posuzovanými povlaky (AluSpeed, Darwin, Tripple Alwin), přičemž nejlepších výsledků (nejnižšího zatížení) bylo dosaženo s VBD s povlakem Darwin (medián 134,73 N),
- u všech povlaků bylo pozorováno kolísání sil (do 20%), které bylo způsobeno, jak prokázala analýza opotřebení, vznikem nárůstku na hřbetě nástroje,

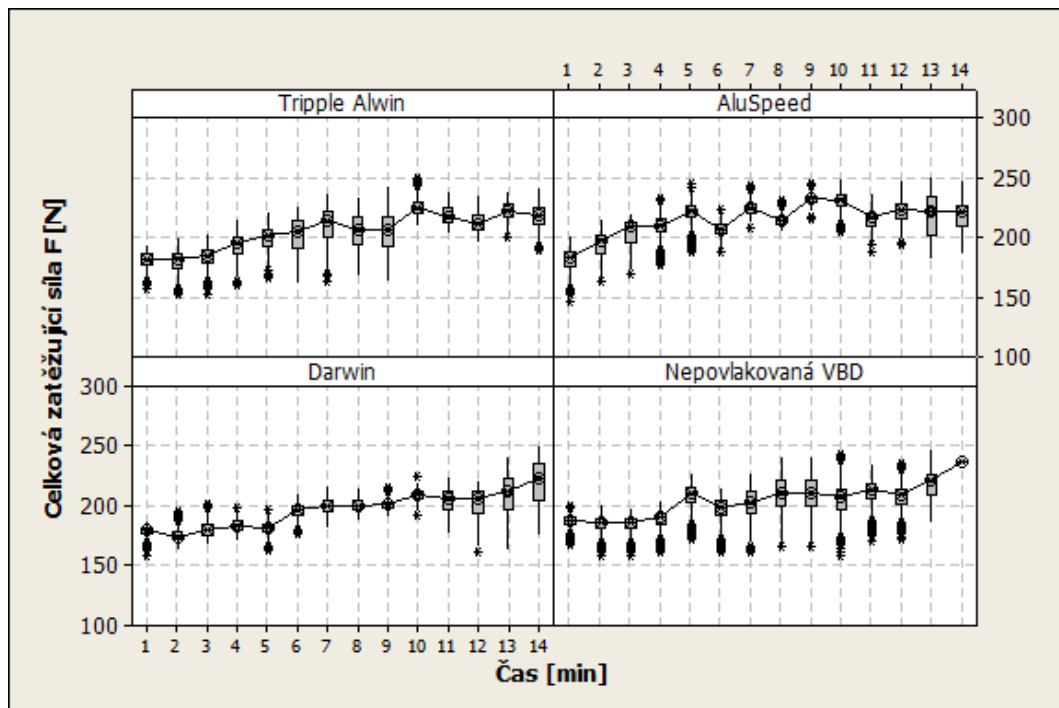
### 3.2. TESTOVÁNÍ NÁSTROJE PRO ROVINNÉ HSC OBRÁBĚNÍ AL SLITINY

- nejnižšího silového zatížení bylo dosaženo s povlakem Darwin na začátku frézování při prvotních testech (medián 134,73 N), nicméně při doplňujícím podrobném měření silového zatížení bylo dosaženo hodnot o 23% vyšších pro stejný typ povlaku,
- stabilně nejvyšší silové zatížení pro nepovlakovaný nástroj pro všechny měřené průjezdy (v rozsahu 1- 33%),
- nejvyšší odolnost vůči opotřebení pro danou aplikaci u VBD opatřených povlakem má VBD s povlakem AluSpeed (VB 53  $\mu\text{m}$ ),
- nejnižší odolnost vůči abrazivnímu opotřebení pro danou aplikaci u VBD opatřených povlakem má VBD s povlakem Tripple Alwin (VB 60  $\mu\text{m}$ )
- vznik kráterů opotřebení na hřbetě a vytrhávání částí řezného materiálu vlivem postupného oddělování nárůstků z čela nástroje u povlaku Tripple Alwin,
- nárůst řezného výkonu od 8 do 45%, přičemž nejnižší řezný výkon byl pozorován u povlaku Darwin (medián 2,45 kW) a u povlaku AluSpeed (medián 3,20 kW).



Obrázek 3.24: Analýza celkového zatížení řezného nástroje - prvotní měření.

### 3. TESTOVÁNÍ NÁSTROJŮ PRO SPECIFICKÉ PODMÍNKY OBRÁBĚNÍ



Obrázek 3.25: Analýza celkového silového zatížení na břit nástroje - podrobné měření.

#### 3.2.8. Měření odklonu a návrh změny geometrie lůžka frézovací hlavy

Vzhledem k přilnutí materiálu na hřbetní ploše, projevujícího se u všech modifikací VBD, bylo přistoupeno k měření odklonu vyměnitelné břitové destičky. Bylo zjištěno, že dochází v průběhu obrábění ke kontaktu hřbetní plochy s obráběnou plochu (špatně zvolená hodnota úhlu hřbetu v ortogonální rovině  $\alpha_o$ ). Proto bylo přistoupeno k invazivní metodě, tj. úpravě geometrie lůžka frézovací hlavy a následně úpravě hodnot úhlu čela v rovině boční a rovině základní:

- úhel čela  $\gamma_p = -7^\circ$  (původní hodnota  $\gamma_p = -2^\circ$ ),
- úhel čela  $\gamma_f = +8^\circ$  (původní hodnota  $\gamma_f = +12^\circ$ ).

#### 3.2.9. Analýza naměřených dat - upravená geometrie lůžka frézovací hlavy

V průběhu testování byly použity řezné podmínky uvedené v kapitole 3.2.2. Testování bylo koncipováno a provedeno následující metodiky měření:

- střídání měřených a neměřených průjezdů (měřeným průjezdem je míněno měření silového zatížení pomocí aparatury Kistler) systémem (1 měřený/1 neměřený) za účelem rychlejšího rozvoje opotřebení nástroje,

### 3.2. TESTOVÁNÍ NÁSTROJE PRO ROVINNÉ HSC OBRÁBĚNÍ AL SLITINY

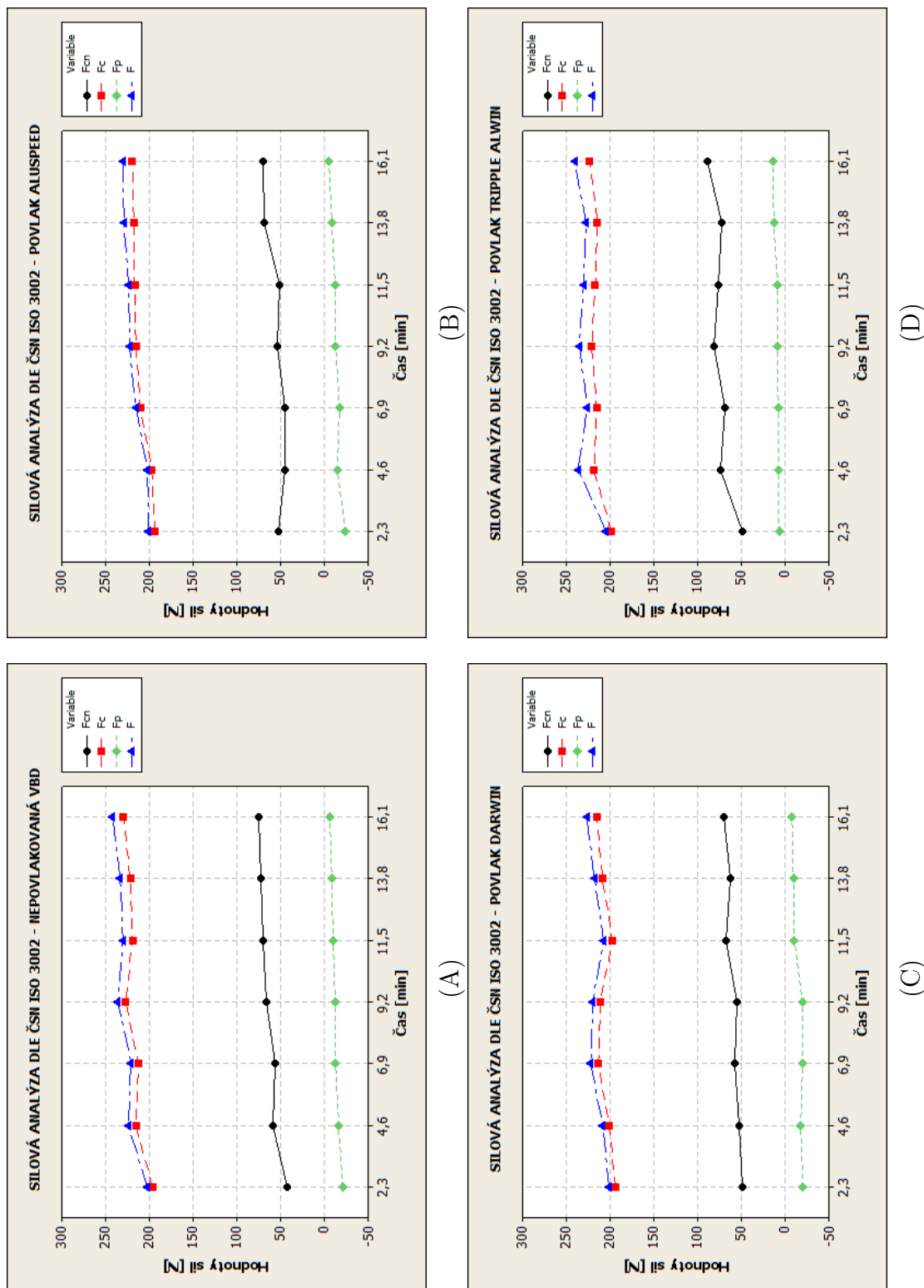
- uspořádání experimentu je znázorněno na obr.3.11 (vlevo - strojní svěrák pro měřené průjezdy s obrobkem o délce 240 mm , vpravo - materiál upnutý ve dvou strojních svěrácích pro neměřené průjezdy o délce 570 mm).

Úprava koncepce a metodiky měření vychází z předchozích zjištěných nedostatků.

Po naměření a zpracování získaných hodnot byly provedeny analýzy stejným způsobem jako při předchozích měřeních. Hypotéza testující normalitu naměřených hodnot a další statistické zpracování bylo provedeno opět pomocí softwaru Minitab, detaily analýz je možné nalézt na přiloženém DVD v souboru ZMENENA\_GEOMETRIE.MPJ. Hypotéza o normálním rozdělení naměřených dat byla opět zamítnuta na hladině významnosti  $\alpha = 0,05$ ; což potvrzuje předpoklad závislosti vysokého rozptylu hodnot na kvalitě obráběného materiálu. Po provedení neparametrického testu Kruskal-Wallis byla nezamítnuta hypotéza o shodě rozdělení naměřených hodnot. Všechny hodnoty mediánů silového zatížení, měrné řezné síly i řezného výkonu jsou uvedeny v tabulce 3.7. Všechny ostatní podstatné statistické ukazatele, jakými je minimální, maximální hodnota, horní a dolní kvantil a další jsou uvedeny v tabulkách v příloze II-7.

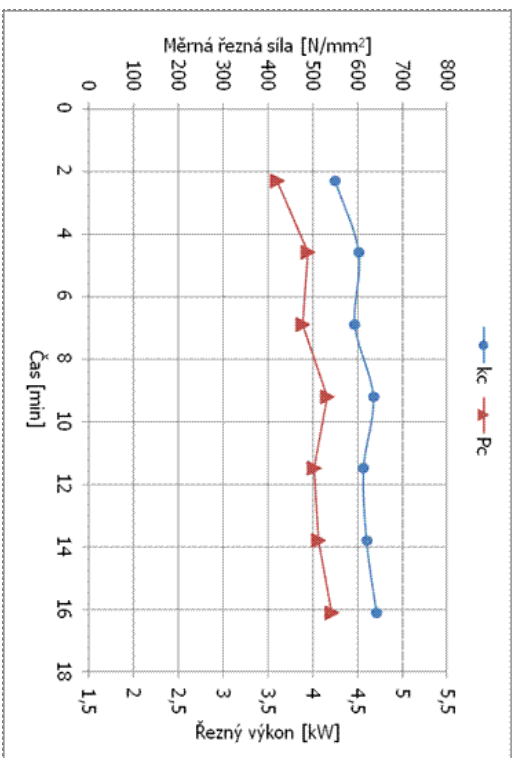


### 3. TESTOVÁNÍ NÁSTROJŮ PRO SPECIFICKÉ PODMÍNKY OBRÁBĚNÍ

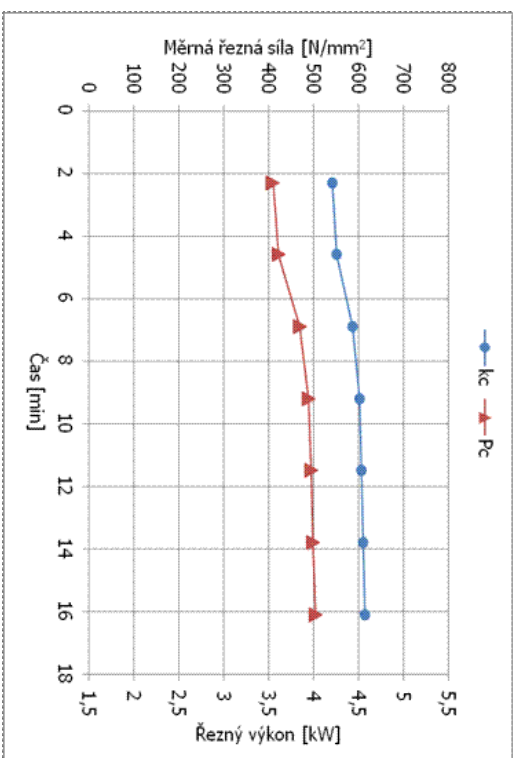


Obrázek 3.26: Analýza řezivosti VBD Pramet Tools, s.r.o. -  $v_c = 1100 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ , symetrické čelní frézování - upravená geometrie - mediány silového zatížení.

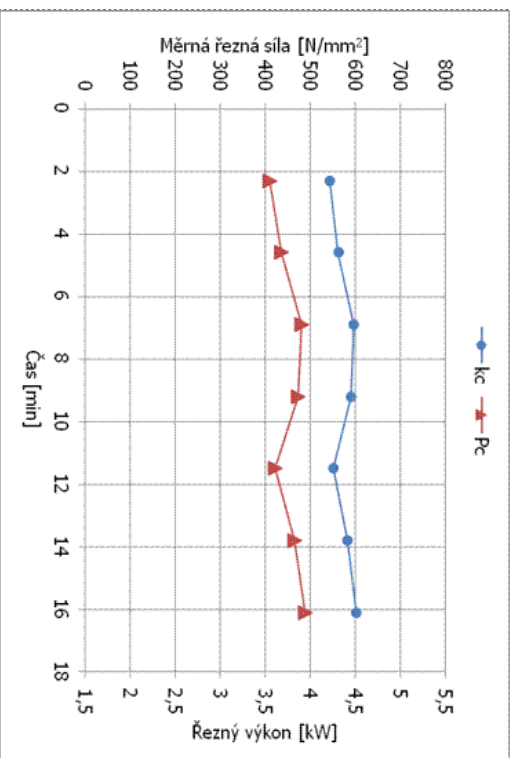
### 3.2. TESTOVÁNÍ NÁSTROJE PRO ROVINNÉ HSC OBRÁBĚNÍ AL SLITINY



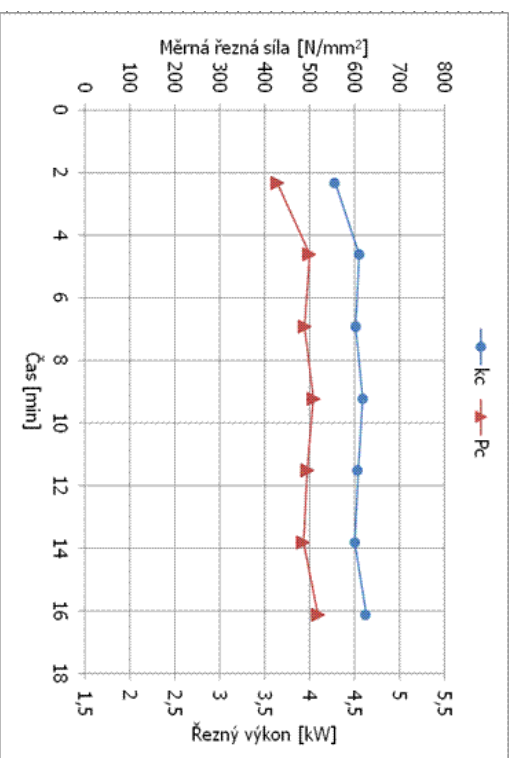
(A)



(B)



(C)



(D)

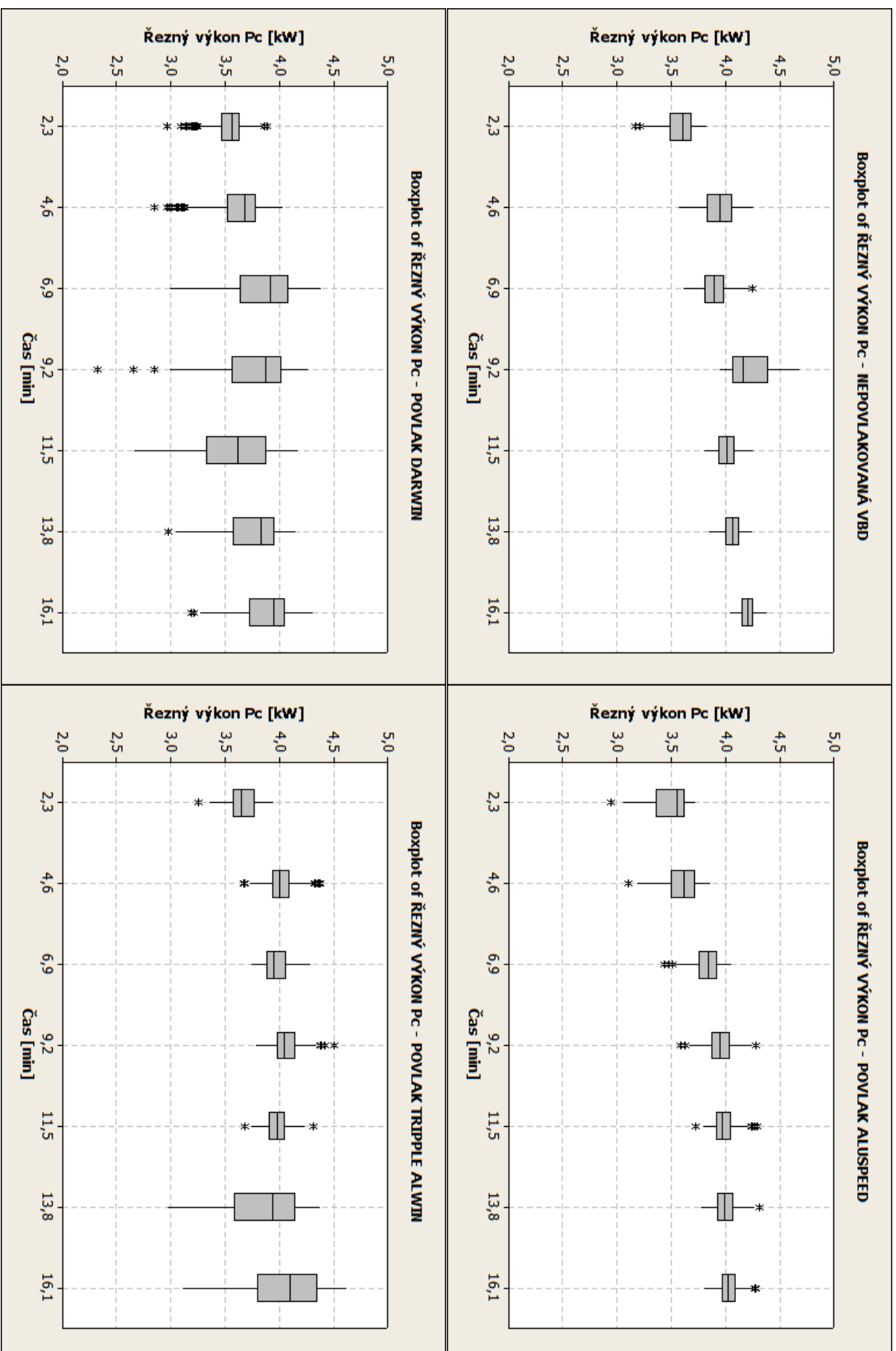
Obrázek 3.27: Analýza řezivosti VBD Pramet Tools, s.r.o. -  $v_c = 1100 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ , symetrické čelní frézování - upravená geometrie; měrná řezná síla - řezný výkon (mediány).

### 3. TESTOVÁNÍ NÁSTROJŮ PRO SPECIFICKÉ PODMÍNKY OBRÁBĚNÍ

Tabulka 3.7: Mediány zatížení charakteristických měřených a dopočítaných veličin - změněná geometrie frézovací hlavy.

Typ povlaku	Čas obrábění T [min]	Řezná síla $F_c$ [N]	Normálová řezná síla $F_{cN}$ [N]	Pasivní síla $F_p$ [N]	Měrná řezná síla $k_c$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Řezný výkon $P_c$ [kW]
Bez povlaku	2,3	196,510	42,795	-20,890	550,448	3,603
	4,6	215,486	58,383	-16,055	603,602	3,951
	6,9	212,260	56,320	-12,890	594,566	3,891
	9,2	227,045	65,960	-12,565	635,980	4,162
	11,5	219,250	70,175	-9,970	614,146	4,020
	13,8	221,690	73,060	-8,425	620,980	4,064
	16,1	229,640	75,295	-6,215	643,249	4,210
AluSpeed	2,3	193,609	52,055	-24,238	542,322	3,549
	4,6	197,226	44,406	-14,792	552,454	3,616
	6,9	209,815	44,866	-17,415	587,717	3,847
	9,2	215,429	53,520	-12,895	603,443	3,950
	11,5	216,764	51,468	-12,399	607,181	3,974
	13,8	217,937	69,077	-8,702	610,466	3,996
	16,1	219,391	69,931	-5,044	614,541	4,022
Darwin	2,3	194,138	48,857	-20,546	543,804	3,559
	4,6	201,126	52,055	-17,651	563,378	3,687
	6,9	213,416	57,664	-19,856	597,804	3,913
	9,2	211,089	54,758	-19,445	591,284	3,870
	11,5	197,098	67,912	-10,616	552,094	3,613
	13,8	208,775	62,297	-9,427	584,803	3,828
	16,1	215,533	69,733	-7,860	603,732	3,951
Tripple Alwin	2,3	198,890	48,591	6,841	557,113	3,646
	4,6	218,315	73,933	7,483	611,527	4,002
	6,9	215,279	69,350	7,907	603,022	3,947
	9,2	220,786	81,734	9,041	618,447	4,048
	11,5	217,140	76,836	8,510	608,234	3,981
	13,8	214,600	73,115	12,859	601,119	3,934
	16,1	223,424	88,525	13,919	625,838	4,096

### 3.2. TESTOVÁNÍ NÁSTROJE PRO ROVINNÉ HSC OBRÁBĚNÍ AL SLITINY



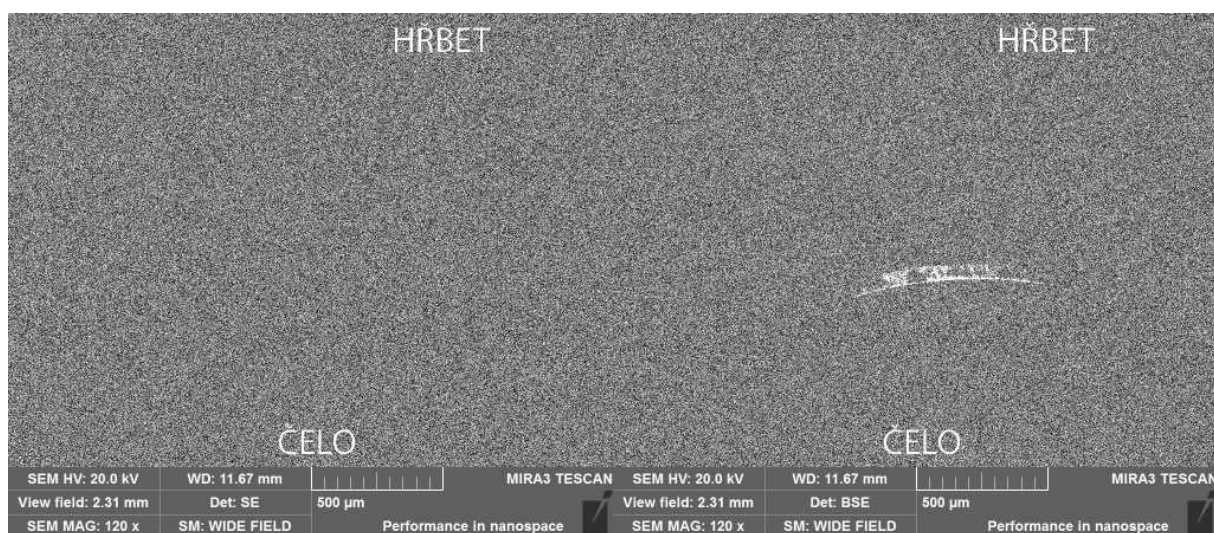
Obrázek 3.28: Krabicové diagramy energetické náročnosti jednotlivých posuzovaných nástrojů v závislosti na objemu odebraného materiálu - upravená geometrie.



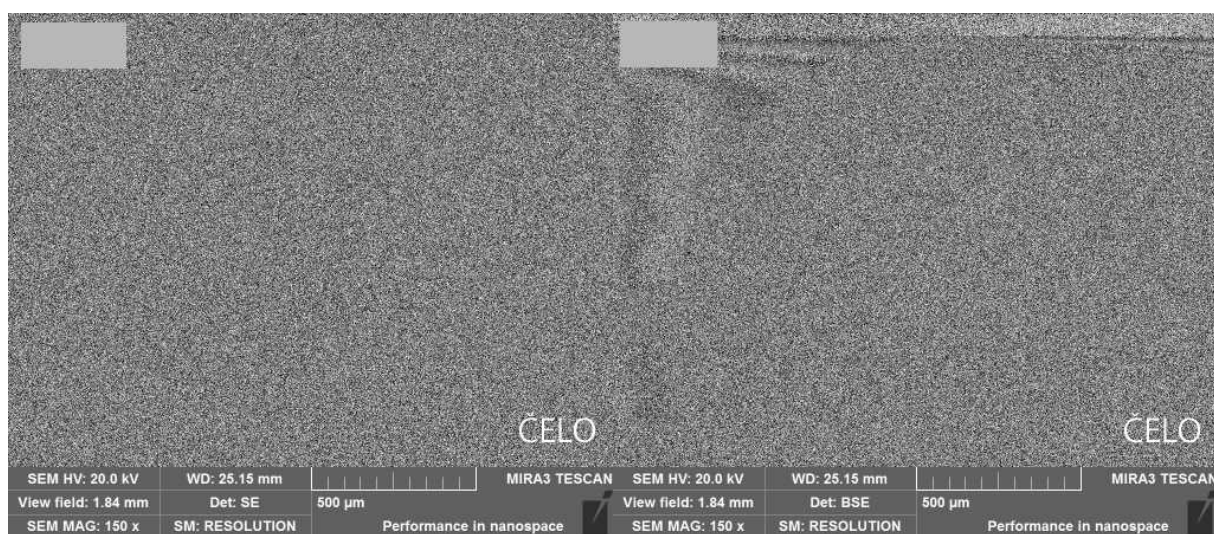
### 3. TESTOVÁNÍ NÁSTROJŮ PRO SPECIFICKÉ PODMÍNKY OBRÁBĚNÍ

#### 3.2.9.1. Analýza opotřebení nástrojů po řezné zkoušce

Na snímcích na obr. 3.29 až obr. 3.31 je znázorněn stav nástroje po 16 minutách obrábění nepovlakované VBD, přičemž je na snímku z elektronového mikroskopu promítnutého ve zpětných elektronech (BSE) znatelná fazetka opotřebení v důsledku abraze, a na hřbetní ploše znatelný přilnutý materiál. Na snímcích čelní plochy (obr. 3.30) jsou vidět části přilnutého materiálu v důsledku adheze, přičemž na snímku znázorněném na obr. 3.31 je znázorněn stav vyměnitelné břitové destičky po odleptání nalepeného materiálu. Na tomto snímku je možné pozorovat výmol na čele vzniklý v důsledku difuzního opotřebení a abraze v kontaktním místě mezi třískou a materiálem břitu. Nejnižší hodnota hřbetního opotřebení VB byla naměřena pro VBD s povlakem AluSpeed ( $VB = 21 \mu\text{m}$ ). Přehled naměřených hodnot opotřebení je uveden v tab. 3.8 a v grafu na obr. 3.32. Kompletní snímková dokumentace opotřebení všech posuzovaných VBD je uvedena v příloze II-6.

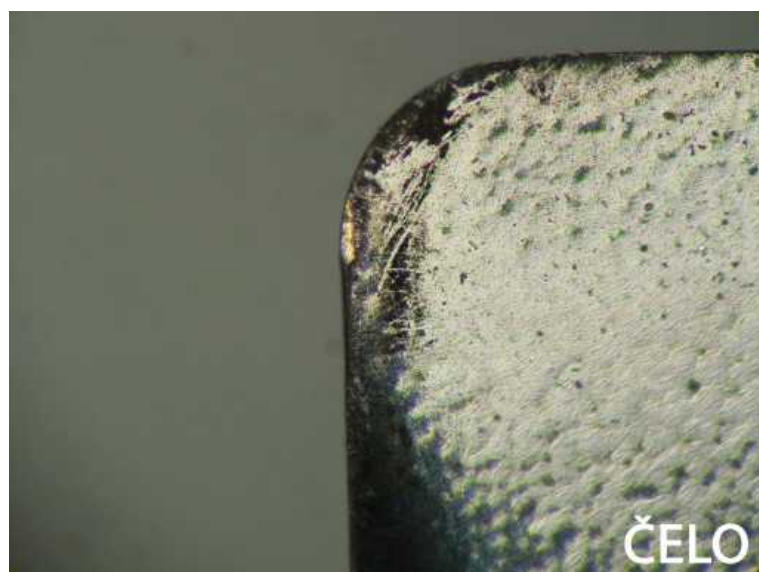


Obrázek 3.29: Hřbetní plocha nástroje po řezných zkouškách - nepovlakovaná VBD.



Obrázek 3.30: Čelní plocha nástroje po řezných zkouškách - nepovlakovaná VBD.

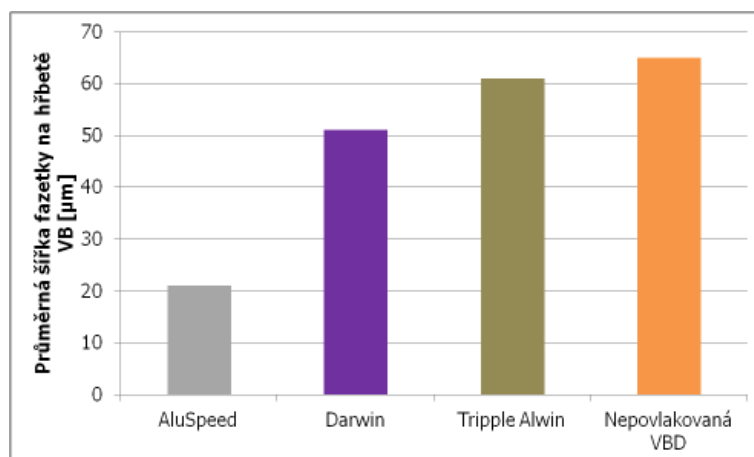
### 3.2. TESTOVÁNÍ NÁSTROJE PRO ROVINNÉ HSC OBRÁBĚNÍ AL SLITINY



Obrázek 3.31: Detail ostří - nepovlakovaná VBD, detail čelní plochy.

Tabulka 3.8: Průměrná šířka fazetky hřbetního opotřebení v kontaktní délce u jednotlivých testovaných VBD - podrobné měření.

Testovaný nástroj	průměrná šířka fazetky na hřbetě VB [ $\mu\text{m}$ ]
AluSpeed	21
Darwin	51
Tripple Alwin	61
Nepovlakovaná VBD	65



Obrázek 3.32: Srovnání průměrné šířky fazetky hřbetního opotřebení v kontaktní délce u jednotlivých testovaných VBD - podrobné měření.

#### 3.2.10. Empirický model

V návaznosti na předchozí analýzy bylo přistoupeno k vytvoření regresního modelu popisujícího velikost měrné řezné síly v závislosti na čase. K popisu dané závislosti byl zvolen

### 3. TESTOVÁNÍ NÁSTROJŮ PRO SPECIFICKÉ PODMÍNKY OBRÁBĚNÍ

model druhého řádu, který dosahoval přijatelné přesnosti. Koeficient určení  $R^2$  udává, do jaké míry jsou změny odezvy popsány daným regresním modelem. V ideálním případě by mělo být měření provedeno v co nejmenších intervalech, aby bylo možné považovat model za věrohodný. Případně je možné využít přístupů plánovaného experimentu a posoudit adekvátnost modelu. Metody DOE (plánovaného experimentu) nemohly být bohužel v tomto případě použity, proto byla zvolena varianta pokročilého statistického zpracování a popisu hodnot.

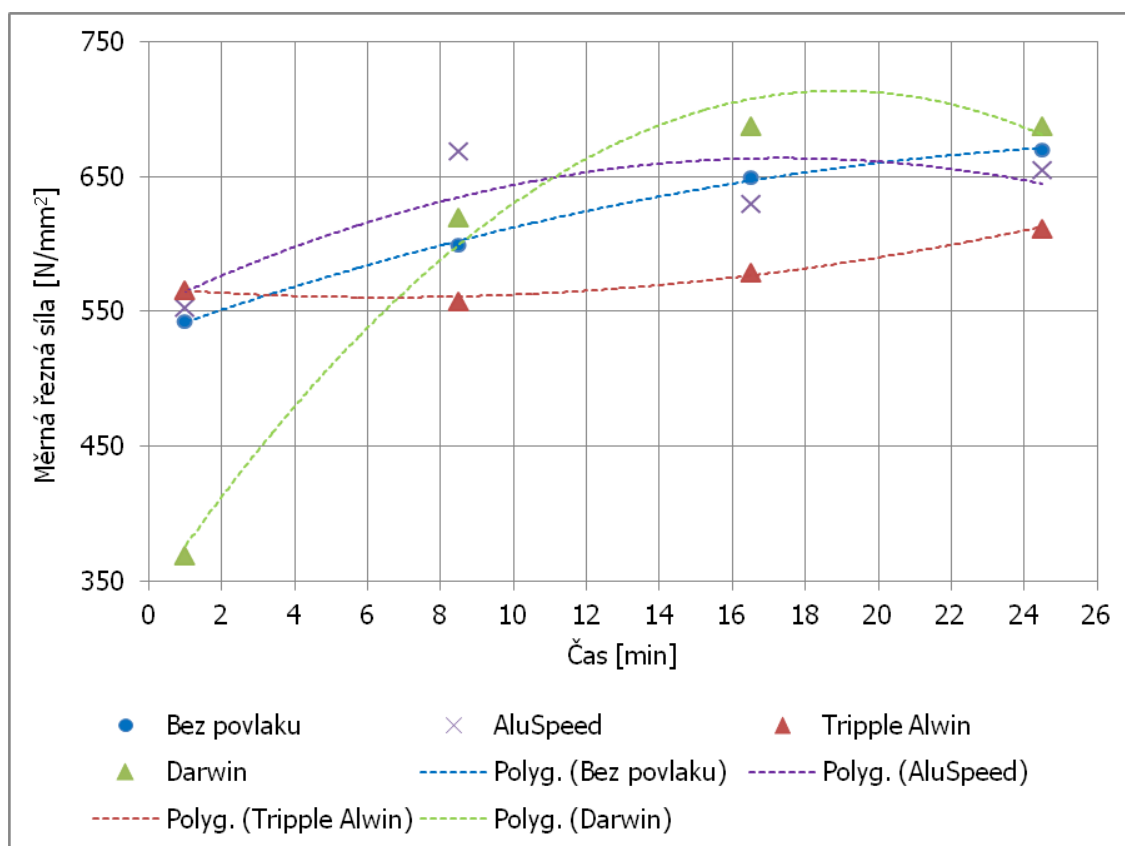
#### Regresní analýza - výchozí geometrie

Získané datové řady (viz obr. 3.33, obr. 3.34) byly proloženy křivkou druhého řádu, přičemž byly získány rovnice regrese popisující změny v modelu. Takto získané závislosti jsou uvedeny v tabulce 3.9.

Tabulka 3.9: Empirické modely pro výchozí geometrii.

Typ povlaku	Regresní model	Koeficient určení $R^2$
Bez povlaku	$k_c = -0,1585 \cdot t^2 + 9,5358 \cdot t + 532,81$	0,9983
AluSpeed	$k_c = -0,3702 \cdot t^2 + 12,838 \cdot t + 552,44$	0,6881
Darwin	$k_c = -1,0519 \cdot t^2 + 39,793 \cdot t + 337,36$	0,9868
Tripple Alwin	$k_c = -0,1621 \cdot t^2 + 2,1069 \cdot t + 567,34$	0,9886

### 3.2. TESTOVÁNÍ NÁSTROJE PRO ROVINNÉ HSC OBRÁBĚNÍ AL SLITINY



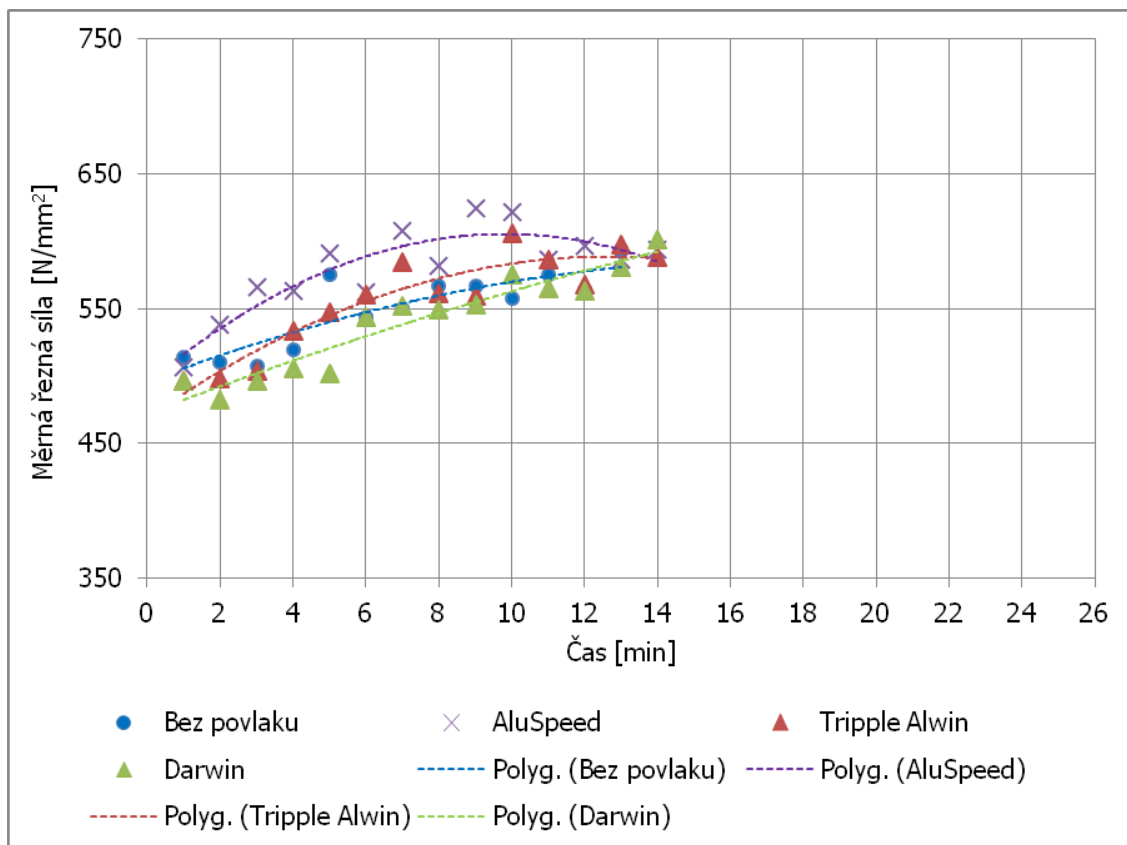
Obrázek 3.33: Celkové zhodnocení velikosti měrné řezné síly pro všechny posuzované povlaky a jejich regresní analýza - výchozí geometrie frézovací hlavy.

Tabulka 3.10: Empirické modely pro výchozí geometrii -doměřený interval hodnot.

Typ povlaku	Regresní model	Koeficient určení $R^2$
Bez povlaku	$k_c = -0,2942 \cdot t^2 + 10,373 \cdot t + 495,71$	0,7876
AluSpeed	$k_c = -1,1500 \cdot t^2 + 22,548 \cdot t + 494,86$	0,7876
Darwin	$k_c = -0,1204 \cdot t^2 + 10,268 \cdot t + 472,28$	0,9108
Tripple Alwin	$k_c = -0,7499 \cdot t^2 + 18,962 \cdot t + 468,8$	0,8721



### 3. TESTOVÁNÍ NÁSTROJŮ PRO SPECIFICKÉ PODMÍNKY OBRÁBĚNÍ



Obrázek 3.34: Celkové zhodnocení velikosti měrné řezné síly pro všechny posuzované povlaky a jejich regresní analýza - výchozí geometrie frézovací hlavy - doměřený interval hodnot.

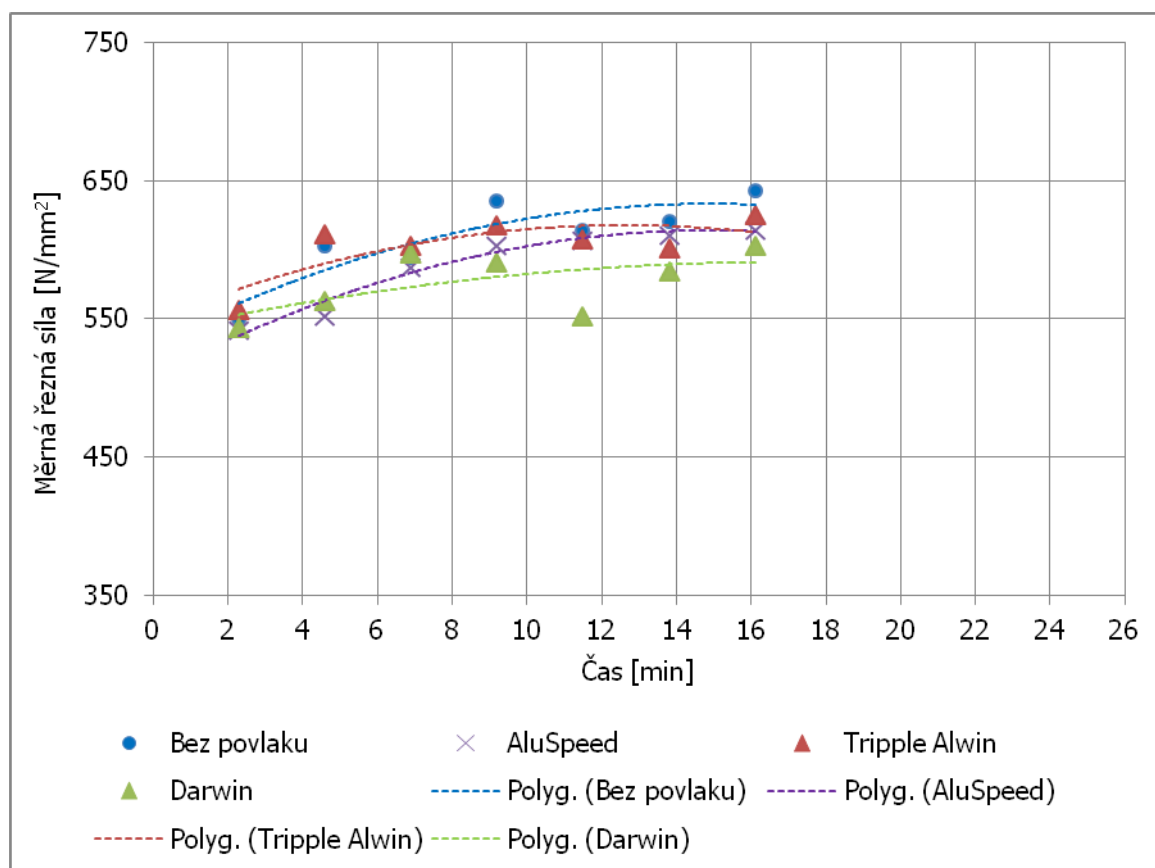
#### Regresní analýza - upravená geometrie lůžka frézovací hlavy

Získané datové řady (reprezentované body v grafu viz obr. 3.33) byly proloženy křivkou druhého řádu, přičemž byly získány rovnice regrese popisující změny v modelu. Takto získané závislosti jsou uvedeny v tabulce 3.11.

Tabulka 3.11: Empirické modely pro změněnou geometrii.

Typ povlaku	Regresní model	Koeficient určení $R^2$
Bez povlaku	$k_c = -0,4536 \cdot t^2 + 13,514 \cdot t + 532,67$	0,7736
AluSpeed	$k_c = -0,4820 \cdot t^2 + 14,336 \cdot t + 507,40$	0,9632
Darwin	$k_c = -0,1736 \cdot t^2 + 5,9414 \cdot t + 540,40$	0,3581
Tripple Alwin	$k_c = -0,4339 \cdot t^2 + 10,943 \cdot t + 548,85$	0,5863

### 3.2. TESTOVÁNÍ NÁSTROJE PRO ROVINNÉ HSC OBRÁBĚNÍ AL SLITINY



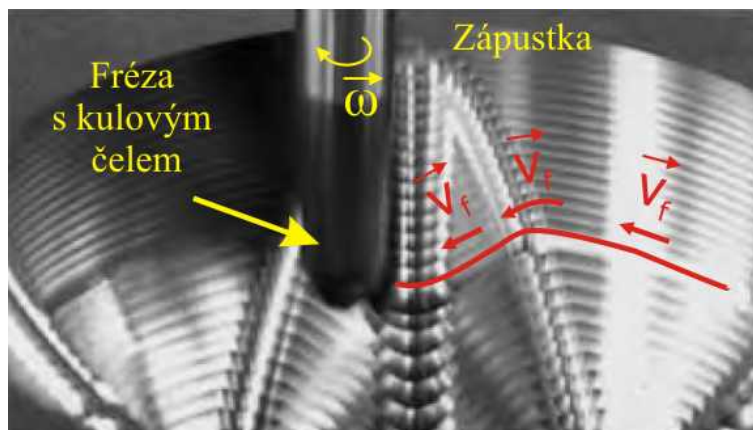
Obrázek 3.35: Celkové zhodnocení velikosti měrné řezné síly pro všechny posuzované povlaky a jejich regresní analýza - upravená geometrie frézovací hlavy - doměřený interval hodnot.

### 3.3. Testování frézovacích nástrojů pro souvislé víceosé obrábění

Problematika frézování forem zápustek nabyla s rozšířením moderních CNC strojů a nástrojů vyrobených z moderních nástrojových materiálů opatřených nástrojovými povlaky na svém významu. Frézování nástroji s kulovým čelem je provázáno problémy souvisejícími s proměnnou velikostí řezné rychlosti na kulové části frézovacího nástroje. Za tuto dobu vznikla celá řada řešení vedoucích k minimalizaci těchto negativních jevů. Většina řešení spočívala ve vedení nástroje v řezu při současném naklopení ve směru posuvu, přičemž většina realizovaných experimentálních zkoušek pro zjištění vlivu naklopení nástroje byla provedena pro tzv. obrábění pomocí taženého/tlačeného nástroje v rozsahu  $0^\circ$  až  $20^\circ$ .

#### 3.3.1. Cíl experimentu

Hlavním cílem experimentu je posoudit vliv faktoru naklopení nástroje na velikost silového zatížení, na parametry drsnosti povrchu a vyjádřit tuto závislost empirickým vztahem, tj. nalézt vztah vyjádřený empirickým modelem. Tato závislost bude hledána pro realizaci experimentálního obrábění s nástrojem vyklopeným ve směru kolmém na směr posuvu, který koresponduje se skutečným většinovým využitím nástroje při výrobě tvarových ploch na součástech typu forma, zápustka při zvolení strategie obrábění znázorněné na obr. 3.36.



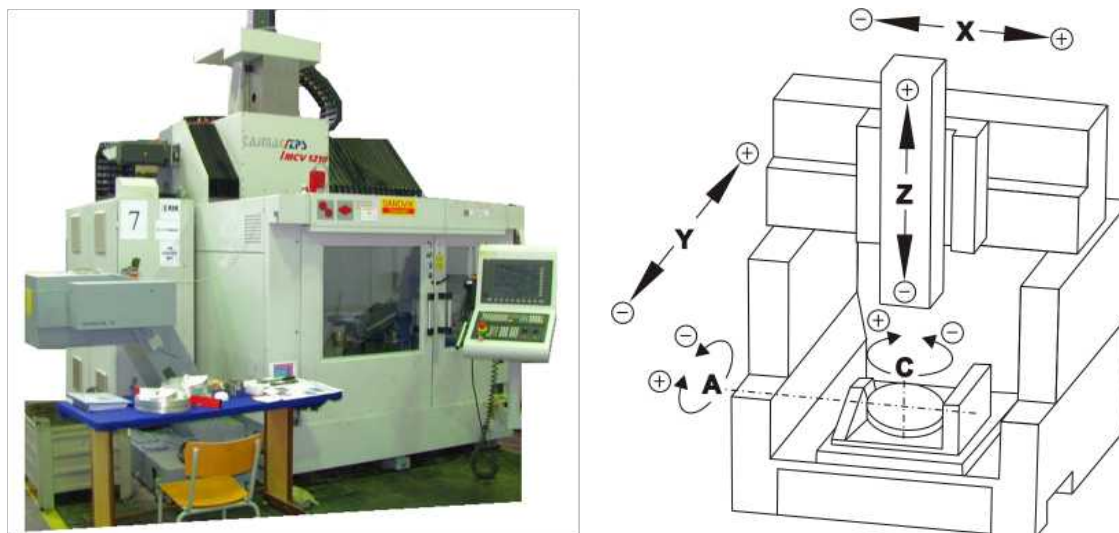
Obrázek 3.36: Strategie obrábění součástí typu zápustka.

#### 3.3.2. Popis experimentu a použitého vybavení

##### Obráběcí stroj

Strojem použitým pro provedení experimentálních zkoušek naklopení nástroje bylo pětiosé obráběcí centrum TAJMAC ZPS MCV 1210, jenž je znázorněno na viz obr. 3.37. Na tomto obrázku je rovněž znázorněna kinematika stroje včetně orientace jednotlivých os.

### 3.3. TESTOVÁNÍ FRÉZOVACÍCH NÁSTROJŮ PRO SOUVISLÉ VÍCEOSÉ OBRÁBĚNÍ

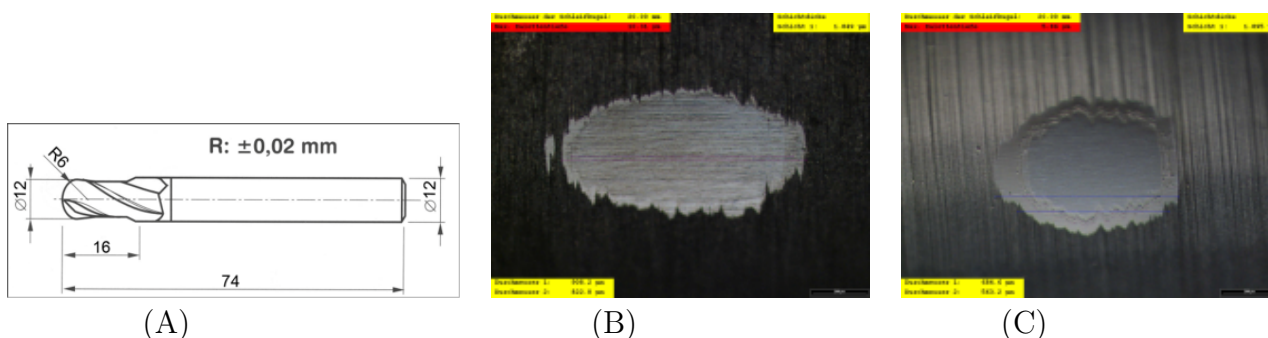


Obrázek 3.37: Pětiosé obráběcí centrum TAJMAC ZPS MCV 1210.

#### Použité nástroje a analyzované povlaky

Pro frézování byly zvoleny dvoubřité nástroje s kulovým čelem o průměru  $\varnothing 12$  mm z rychlořezné oceli (HSS-PM (Co8)) s úhlem stoupání šroubovice  $25^\circ$  (DIN 1889) vyrobené pomocí práškové metalurgie (ASP® 2052, Erasteel) – viz obr. 3.38(A). Byly posuzovány tři modifikace povrchu nástrojů:

1. nepovlakovaný nástroj,
2. nástroj s povlakem  $(\text{Ti}_{0,4}\text{Al}_{0,6})\text{N}$  (obchodní označení “HYPERLOX”),
3. nástroj s povlakem  $\text{TiB}_2$  (obchodní označení “ALU-SPEED”).



Obrázek 3.38: (A) Charakteristické rozměry nástroje, (B) provedný kalotest  $(\text{Ti}_{0,4}\text{Al}_{0,6})\text{N}$ , (C) Provedný kalotest  $\text{TiB}_2$ .

Povlaky byly nanášeny PVD povlakovací technologií ve firmě CemeCon, s.r.o., Ivančice, na povlakovacím centru CC800/9ML - obr. 3.39 (A). Teplota v průběhu depozice povlaků byla v rozsahu  $450 \div 480^\circ\text{C}$ . Tloušťka povlaku byla ověřena pomocí kalotestu (viz obr. 3.38(B), (C)). Nominální charakteristiky povlaků jsou uvedeny v tab. 3.12, přičemž tloušťka povlaku byla ovlivněna směrovým efektem daným technologií povlakování.

### 3. TESTOVÁNÍ NÁSTROJŮ PRO SPECIFICKÉ PODMÍNKY OBRÁBĚNÍ

Tabulka 3.12: Nominální charakteristiky posuzovaných povlaků.

Povlak	Skupina	Složení	Struktura	Max. prac. teplota [°C]	Tvrdost [HV 0,05]	Koef. tření [-]	Tloušťka povlaku [μm]
HYPERLOX	super-nitrid	(Ti <sub>0,4</sub> Al <sub>0,6</sub> )N	Nano-kompozitní	1100	3700	0,3	3,0±1,0
ALUSPEED	borid	TiB <sub>2</sub>	monovrstva	900	4000	0,3	4,5±1,5

#### Řezné podmínky a uspořádání experimentu

Zvolené řezné podmínky jsou uspořádány v tab. 3.13. Experimentální zkouška byla koncipována jako krátkodobá, přičemž uspořádání experimentu je patrné z obr. 3.39 (B).

Tabulka 3.13: Řezné podmínky.

Úhel naklonění $\beta$ [°]	Efektivní průměr $D_{\text{eff}}$ [mm]	Řezná rychlost $v_c$ [m.min <sup>-1</sup> ]	Posuv $f$ [mm/ot.]	Šířka záběru ostří $a_p$ [m.min <sup>-1</sup> ]
0,0	8,9	80	0,15	2,0
2,5	9,2			
5,0	9,6			
7,5	9,9			
10,0	10,2			
12,5	10,5			
15,0	10,7			
17,5	10,9			
20,0	11,1			



(A)



(B)

Obrázek 3.39: (A) Povlakovací centrum, (B) uspořádání experimentu.

### 3.3. TESTOVÁNÍ FRÉZOVACÍCH NÁSTROJŮ PRO SOUVISLÉ VÍCEOSÉ OBRÁBĚNÍ

#### Materiál obrobku

Pro experimentální testy byl zvolen materiál EN AW- $\text{AlSi12(Cu)}$ . Materiál je často používán v automobilovém průmyslu, přičemž jsou velmi často vyráběny součásti složitých tvarů. Chemické složení, mechanické a fyzikální vlastnosti hliníkové slitiny jsou uvedeny rovněž v tab.3.14. Rozměry polotovaru byly 100x100x60 mm. Rovněž byl odebrán vzorek a provedena analýza materiálu pomocí rastrovacího elektronového mikroskopu. Výsledky analýzy jsou uvedeny v příloze IV.

Tabulka 3.14: Chemické složení materiálu obrobku, mechanické a fyzikální vlastnosti.

Chemický prvek	Cu	Fe	Zn	Ni	Pb	Sn	Cr	Si	Mn	Mg	Ti
Atomová hmotnost	0,90-1,00	0,70-0,80	0,55	0,30	0,20	0,10	0,10	10,5-13,5	0,05-0,55	0,35	0,15

Mechanické vlastnosti			
Mez kluzu $R_{e_{min}}$ [MPa]	Mez pevnosti $R_m$ [MPa]	Tvrdost [HBS]	Tažnost $A_{50}$ [%]
150	80	50	1

Fyzikální vlastnosti			
Hustota $\rho$ [ $\text{kg}\cdot\text{dm}^{-3}$ ]	Koeficient teplotní roztažnosti $\alpha$ [ $\text{K}^{-1}\cdot 10^{-6}$ ]	Tepelná vodivost $\lambda_t$ [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ]	Elektrická vodivost [MS/m]
2,65	293 - 373	130 - 150	130 - 150

#### 3.3.3. Výběr faktorů a stanovení úrovní faktorů

Experimentální zkoušky řezivosti nabízí celou řadu parametrů, které je možné měnit a ovlivňovat. Z toho vyplývá potencionální možnost vysoké variability jednotlivých faktorů, které mohou následně vést k rozsáhlým experimentálním měřením. Vzhledem k povaze řešené problematiky, ve které bylo hlavním úkolem nalezení vlivu naklopení nástroje na silové zatížení byly v průběhu experimentu zachovány řezné podmínky. Účelem bylo zejména zjednodušení a snížení rozsahu experimentu, přičemž byla zachována výtěžnost výsledků.

V tabulce 3.15. je uveden přehled vstupních faktorů, jejich rozsah byl volen na základě praktických zkušeností a na základě informací dostupných v odborné literatuře. Význam číselných úrovní faktorů označeného coat. je následující:

- 1 (nástroj bez povlaku),
- 2 (nástroj povlakovaný ( $\text{Ti}_{0,4}\text{Al}_{0,6}\text{N}$ )),
- 3 (nástroj povlakovaný  $\text{TiB}_2$ ).

### 3. TESTOVÁNÍ NÁSTROJŮ PRO SPECIFICKÉ PODMÍNKY OBRÁBĚNÍ

Tabulka 3.15: Nastavitelné faktory a jejich úrovně.

Ozn.	význam faktoru	Jedn.	dolní	střední	horní	Proměnná
$\beta$	úhel naklopení	[°]	0	10	20	ANO
Coat.	druh povlaku	[-]	1	2	3	ANO
$v_c$	řezná rychlost	[m.min <sup>-1</sup> ]	80,00			NE
$f$	posuv na zub	[mm]	0,15			NE
$a_p$	axiální šířka záběru ostří	[mm]	2,00			NE
$a_e$	radiální šířka záběru ostří	[mm]	8,90			NE

- *Úhel naklopení:* Pomocí předběžných zkoušek bylo zjištěno, že optimální hodnoty naklopení řezného nástroje ve směru posuvu je v rozsahu 10 až 15°, což odpovídá i informacím uvedeným v odborné literatuře. Z tohoto důvodu byla zvolena dolní úroveň faktoru naklopení nástroje na hodnotu 0° a horní úroveň 20°.
- *Druh povlaku:* na základě předběžných experimentálních zkoušek vykonaných v rámci spolupráce s firmou CemeCon s.r.o. byly vybrány dva povlaky vhodné pro danou aplikaci, povlak (Ti<sub>0,4</sub>Al<sub>0,6</sub>)N a povlak TiB<sub>2</sub>. Volba nepovlakovaného nástroje byla provedena z důvodu ověření vlivu povlaku na odezvu, tj. zjištění rozdílnosti naměřených hodnot pro zvolené nástroje.
- *Řezná rychlost, posuv na zub, axiální šířka záběru ostří:* hodnoty těchto faktorů byly zvoleny na základě předběžných experimentálních zkoušek, přičemž byla vzata v úvahu povaha řešeného experimentu plánovaná pro dokončovací obrábění forem a zápusťek.
- *radiální šířka záběru ostří:* vzhledem k realizaci experimentálních zkoušek do plného materiálu byla tato hodnota závislá na velikosti  $a_p$ .

#### 3.3.4. Volba odezvy

Měřenou odezvou v průběhu experimentálních zkoušek byla velikost silového zatížení působícího na nástroj.

V průběhu a po vykonání experimentálních zkoušek je možné snímat celou řadu parametrů, přičemž byly vzhledem k povaze experimentu zvoleny tyto:

- drsnost povrchu vyjádřená parametry Ra a Rz [ $\mu\text{m}$ ],
- početně určená hodnota měrné řezné síly  $k_c$  [N.mm<sup>-2</sup>].

Dále byl sledován stav třísek, jejich podobu, tvar a v případě změny vybraných sledovaných parametrů, bylo rozhodnuto o provedení analýzy vybraných třísek na světelném mikroskopu.



#### 3.3.5. Plán experimentu

Zvoleným plánem experimentu byl faktoriální plán se dvěma faktory a dvěma úrovněmi.

Plán experimentu byl vytvořen za pomoci softwaru Minitab, který obsahuje nástroj pro plánování experimentu (ozn. DOE) pro plánování a následnou analýzu naměřených dat. Byla zvolena následující struktura plánu:

- jádro plánu je tvořeno plným faktoriálním plánem  $2^k$ , kde exponent  $k$  je roven dvěma posuzovaným faktorům. Jádro plánu pak obsahuje  $2^2 = 4$  měření bez replikací,
- centrální body  $n_c = 1$  (bez replikací),
- počet replikací  $n = 3$ .

Počet měření včetně replikací je roven  $N = ((4 + 1) \cdot 3) = 15$ . Počet replikací byl zvolen s ohledem na možnost následného testování adekvátnosti modelu a zvýšení spolehlivosti výsledků.

#### 3.3.6. Realizace experimentu

Experimentální měření probíhalo v dílenských prostorách ÚST na vybavení popsaném v kapitole 3.3.2. K zajištění náhodnosti měření byla použita metoda volby nastavení různých podmínek losem, čímž byla zajištěna nezávislost jednotlivých měření. Vzhledem k rozsahu experimentu bylo možné provést měření za účasti stejného operátora, při použití materiálu z jedné dávky. Při analýze obráběného materiálu byla zjištěna pórovitost materiálu, která může mít vliv na odezvu a je dána technologií výroby polotovaru obrobku. Při statistickém zpracování dat bylo k tomuto nedostatku obráběného materiálu přihlédnuto, nicméně navzdory tomu byla předpokládána homogenita obráběného materiálu a nebylo nutné využívat metody blokování.

#### 3.3.7. Statistická interpretace výsledků

Obecný postup při vyhodnocování spočívá v postupném zvyšování složitosti modelu, nejprve proložit data lineárním modelem prvního řádu a v případě jeho neadekvátnosti postupně přecházet k modelu vyššího řádu, případně až k modelu nelineárnímu[42]. První část analýzy naměřených dat je zaměřena na testování normality dat a vyhledání vhodného reprezentanta skupiny. Navazujícím krokem je určení statisticky nevýznamných členů a jejich vyloučení z modelu. Dále je nutné otestovat adekvátnost zjištěného modelu a analyzovat rezidua, aby bylo možné prohlásit model za dostatečně přesný.

Pro všechny analýzy byl použit statistický software Minitab.

V průběhu prvotní analýzy naměřených hodnot byla zjištěna neadekvátnost modelu a bylo třeba přidat do plánu experimentu další body  $n_c = 3$  a provést měření. Touto úpravou



### 3. TESTOVÁNÍ NÁSTROJŮ PRO SPECIFICKÉ PODMÍNKY OBRÁBĚNÍ

plánu experimentu bylo dosaženo celkového počtu měření  $N = 18$ . V tab. 3.16 jsou uvedeny výsledky analýzy doplněné o další měření pro hodnotu měrné řezné síly  $k_c$ , přičemž výsledky ukazují statistickou nevýznamnost interakce dvou posuzovaných faktorů (A), proto byla tato interakce odstraněna a výsledky po odstranění této interakce jsou uvedeny v tab. 3.16 (B). Rovněž bylo zjištěno, že zakřivení modelu je statisticky nevýznamné, proto nebylo nutné doplnit plán experimentu dalšími měřeními.

Tabulka 3.16: Statistická interpretace analyzovaných dat (A) pro všechny posuzované faktory, (B) po vyřazení statisticky nevýznamných faktorů.

#### Factorial Fit: $k_c$ versus Naklopení; Povlak

Estimated Effects and Coefficients for $k_c$ (coded units)						
Term	Effect	Coef	SE Coef	T	P	
Constant		577,99	3,101	186,40	0,000	
Naklopení	-75,30	-37,65	3,101	-12,14	0,000	
Povlak	20,43	10,22	3,101	3,29	0,008	
Naklopení*Povlak	-6,29	-3,14	3,101	-1,01	0,334	
Ct Pt		12,01	6,934	1,73	0,114	

S = 10,7417 PRESS = 2596,14  
R-Sq = 94,20% R-Sq(pred) = 86,94% R-Sq(adj) = 91,88%

#### Analysis of Variance for $k_c$ (coded units)

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Main Effects	2	18262,8	18262,8	9131,4	79,14	0,000
Naklopení	1	17010,3	17010,3	17010,3	147,42	0,000
Povlak	1	1252,6	1252,6	1252,6	10,86	0,008
2-Way Interactions	1	118,7	118,7	118,7	1,03	0,334
Naklopení*Povlak	1	118,7	118,7	118,7	1,03	0,334
Curvature	1	346,2	346,2	346,2	3,00	0,114
Residual Error	10	1153,8	1153,8	115,4		
Pure Error	10	1153,8	1153,8	115,4		
Total	14	19881,6				

#### Estimated Coefficients for $k_c$ using data in uncoded units

Term	Coef
Constant	588,917
Naklopení	-3,13611
Povlak	13,3611
Naklopení*Povlak	-0,314444
Ct Pt	12,0111

(A)

#### Factorial Fit: $k_c$ versus Naklopení; Povlak

Estimated Effects and Coefficients for $k_c$ (coded units)						
Term	Effect	Coef	SE Coef	T	P	
Constant		577,99	3,105	186,16	0,000	
Naklopení	-75,30	-37,65	3,105	-12,13	0,000	
Povlak	20,43	10,22	3,105	3,29	0,007	
Ct Pt		12,01	6,943	1,73	0,112	

S = 10,7555 PRESS = 2320,86  
R-Sq = 93,60% R-Sq(pred) = 88,33% R-Sq(adj) = 91,85%

#### Analysis of Variance for $k_c$ (coded units)

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Main Effects	2	18262,8	18262,8	9131,4	78,94	0,000
Naklopení	1	17010,3	17010,3	17010,3	147,04	0,000
Povlak	1	1252,6	1252,6	1252,6	10,83	0,007
Curvature	1	346,2	346,2	346,2	2,99	0,112
Residual Error	11	1272,5	1272,5	115,7		
Lack of Fit	1	118,7	118,7	118,7	1,03	0,334
Pure Error	10	1153,8	1153,8	115,4		
Total	14	19881,6				

#### Estimated Coefficients for $k_c$ using data in uncoded units

Term	Coef
Constant	595,206
Naklopení	-3,76500
Povlak	10,2167
Ct Pt	12,0111

(B)

Dalším podstatným krokem je posouzení adekvátnosti získaného regresního modelu získaného pro hladinu významnosti  $\alpha = 0,05$ . Hodnota „Lack of fit“ vyjadřující vzdálenost modelu od průměrných naměřených hodnot je  $s_r^2 = 118,7$ , přičemž  $p = 0,334$ . Tato hodnota vyjadřuje, že model je adekvátní naměřeným hodnotám.

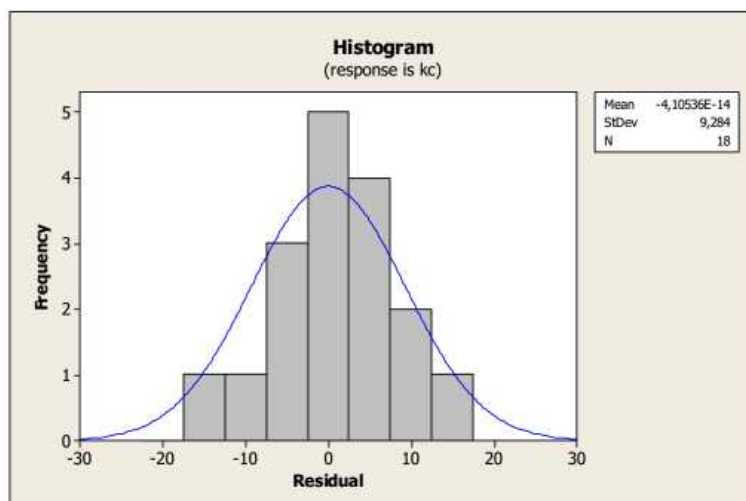
Posledním krokem pro zjištění vhodnosti navrženého modelu je analýza reziduí, přičemž v ideálním případě mají rezidua normální rozdělení. Grafické znázornění analýzy reziduí je uvedeno na obr. 3.40 a z histogramu je možné usoudit, že rezidua kopírují přibližně tvar křivky normálního rozdělení, což opět potvrzuje předpoklad o adekvátnosti modelu.

### Získaný regresní model a závislosti faktorů

V návaznosti na předchozí analýzy vyplývá, že je možné k popisu závislosti mezi danými faktory použít regresní model:

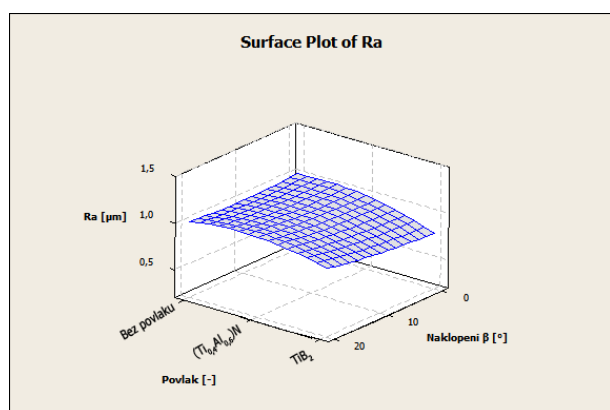
$$k_c = -3,765 \cdot \beta + 10,217 \cdot N + 595,206 \quad (3.5)$$

### 3.3. TESTOVÁNÍ FRÉZOVACÍCH NÁSTROJŮ PRO SOUVISLÉ VÍCEOSE OBRÁBĚNÍ

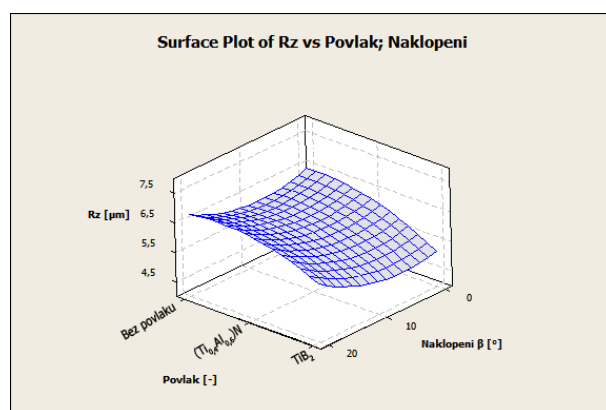


Obrázek 3.40: Analýza reziduí - histogram četnosti pod křivkou normálního rozdělení.

, přičemž predikovaná přesnost modelu je  $R^2 = 88,33\%$ ,  $\beta$  je naklopení nástroje a  $N$  je parametr zahrnující vliv povlaku.



(A) Závislost na parametru drsnosti povrchu  $R_a$



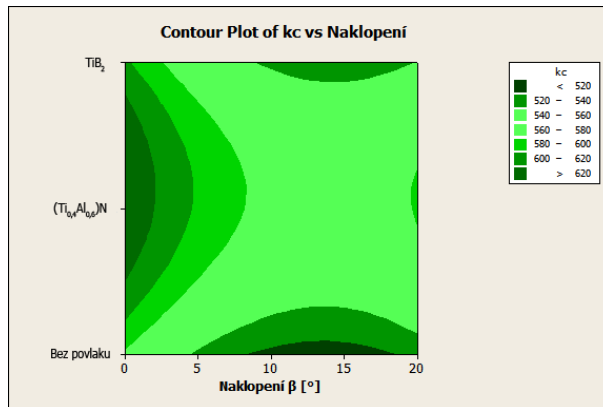
(B) Závislost na parametru drsnosti povrchu  $R_z$

Obrázek 3.41: Surface plot závislosti parametrů drsnosti povrchu na úhlu naklopení nástroje a typu použitého povlaku.

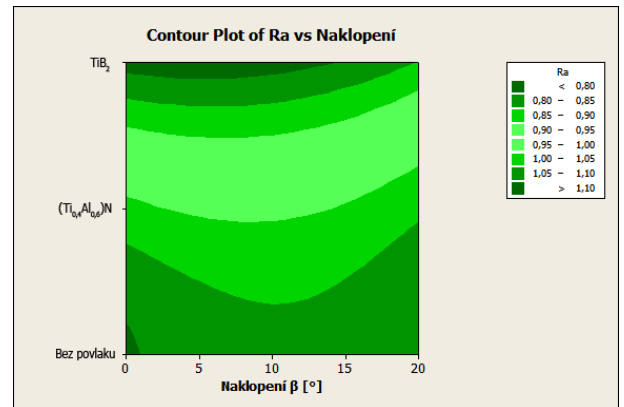
Grafy vyjadřující závislosti predikovaných parametrů drsnosti povrchu  $R_a$  a  $R_z$  jsou znázorněny na obr. 3.41 (A, B). Z obou grafů je zřejmé dosažení minimální hodnoty obou parametrů pro úhel naklopení blízký se hodnotě  $10^\circ$ , při použití nástroje s povlakem  $TiB_2$ .

Na obr. 3.42 jsou znázorněny predikované hodnoty získaného empirického modelu pomocí grafů „countour plot“, které přehledně vyjadřují velikost parametrů odhadovaných regresním modelem. V grafu (A) je znázorněna závislost měrné řezné síly na úhlu naklopení nástroje. Z grafu je možné vyzorovat, že paradoxně nejnižších hodnot měrné řezné síly bylo dosaženo s nástrojem bez povlaku pro nastavení úhlu naklopení nástroje  $\beta = 10$  až  $15^\circ$ . Nejnižší dosahovaná drsnost povrchu pro oba vybrané parametry  $R_a$  a  $R_z$  byla dosažena s povlakem  $TiB_2$  v rozsahu naklopení v intervalu od  $5$  až do  $15^\circ$  (viz obr. 3.42 (B, C)).

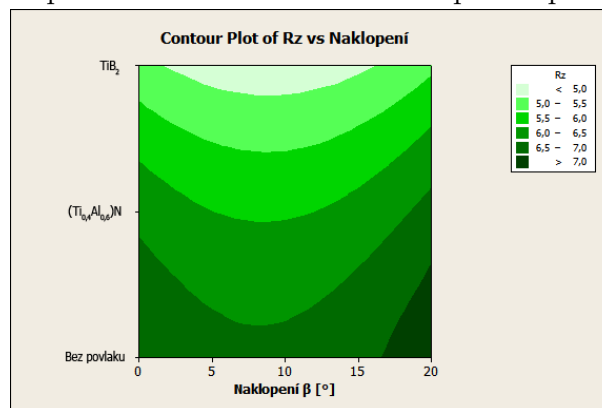
### 3. TESTOVÁNÍ NÁSTROJŮ PRO SPECIFICKÉ PODMÍNKY OBRÁBĚNÍ



(A) Závislost  $k_c$  na úhlu naklonění a použitém druhu povlaku.



(B) Závislost parametru drsnosti  $R_a$  na úhlu naklonění a použitém druhu povlaku.



(C) Závislost parametru drsnosti  $R_z$  na úhlu naklonění a použitém druhu povlaku.

Obrázek 3.42: Grafické závislosti predikovaných velikostí měrné řezné síly  $k_c$  a parametrů drsnosti povrchu  $R_a$ ,  $R_z$  na úhlu naklonění a použitém druhu povlaku.

Stejným způsobem byly vyhodnoceny a získány i regresní modely pro parametry drsnosti povrchu  $R_a$  a  $R_z$ . Byla získána regresní rovnice pro parametr  $R_a$  ve tvaru:

$$Ra = 0,0021 \cdot \beta - 0,198 \cdot N + 0,0024 \cdot \beta \cdot N + 0,887 \quad (3.6)$$

, přičemž predikovaná přesnost modelu je  $R^2 = 83,28\%$  a pro parametr drsnosti  $R_z$  regresní rovnicí ve tvaru:

$$Rz = 0,010 \cdot \beta - 1,150 \cdot N + 0,0037 \cdot \beta \cdot N + 5,786 \quad (3.7)$$

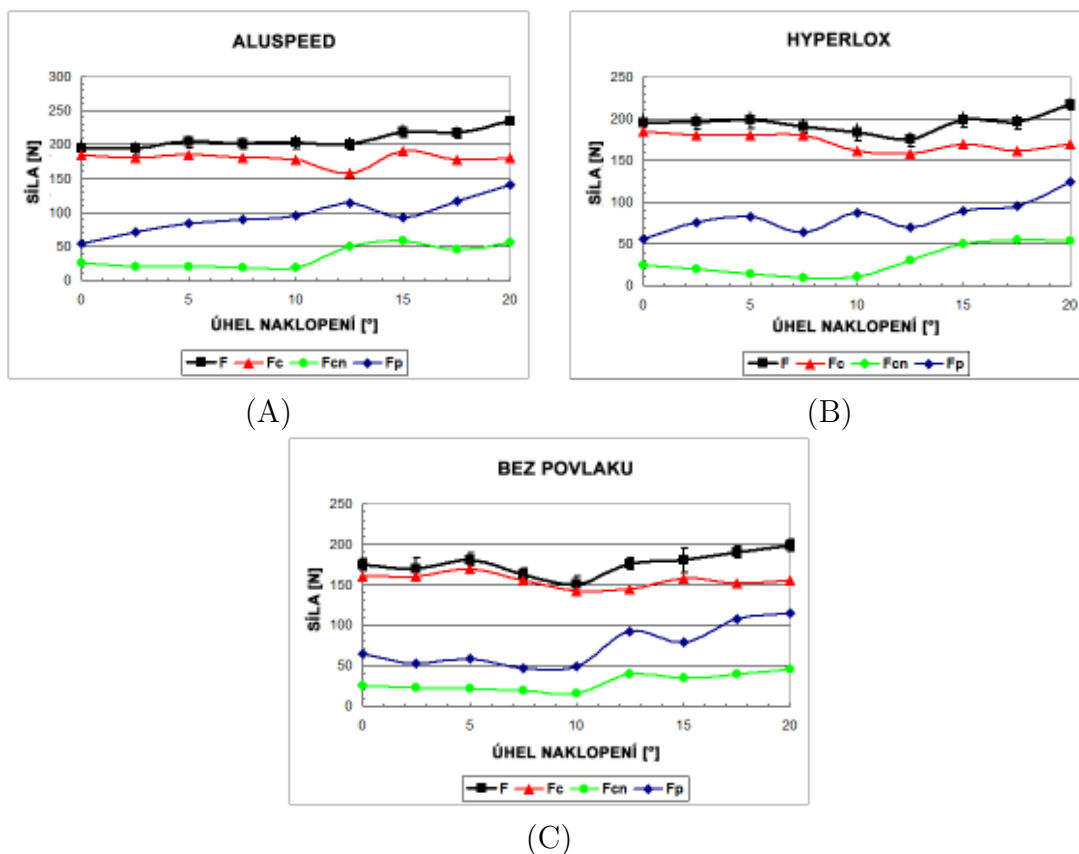
, přičemž predikovaná přesnost modelu je  $R^2 = 82,78\%$ .

Ze statistického hlediska jsou tyto hodnoty nízké a regresní modely by měly být zamítnuty, nicméně z praktického hlediska je tato hodnota dostačující pro odhad parametrů drsnosti povrchu obrobené plochy.

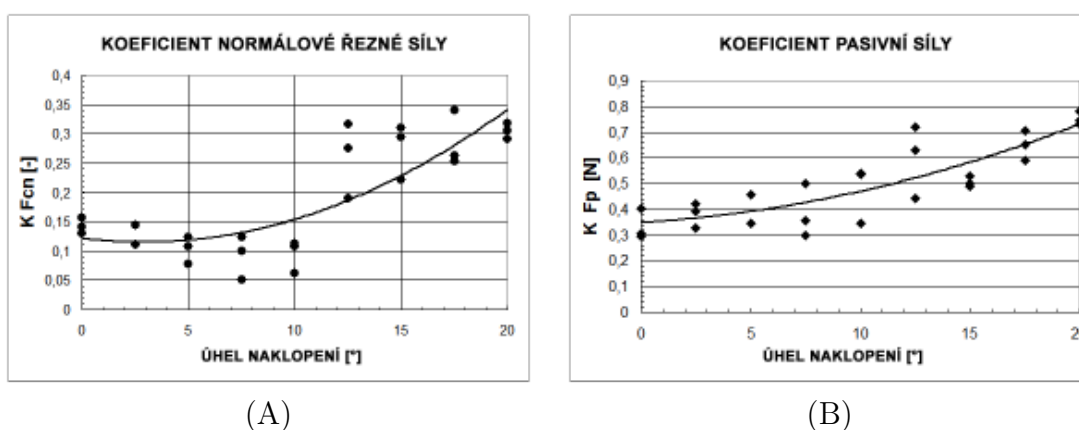
### 3.3. TESTOVÁNÍ FRÉZOVACÍCH NÁSTROJŮ PRO SOUVISLÉ VÍCEOŠÉ OBRÁBĚNÍ

#### Verifikace z ískaného modelu

Pro ověření funkčnosti modelu byly naměřeny hodnoty silového zatížení v rozsahu naklonění 0 až 20° s krokem 2,5° a výpočetně byly určeny velikosti měrné řezné síly pro jednotlivé naměřené hodnoty. Výsledky měření jsou uvedeny v grafech na obr. 3.43 až obr. 3.45.

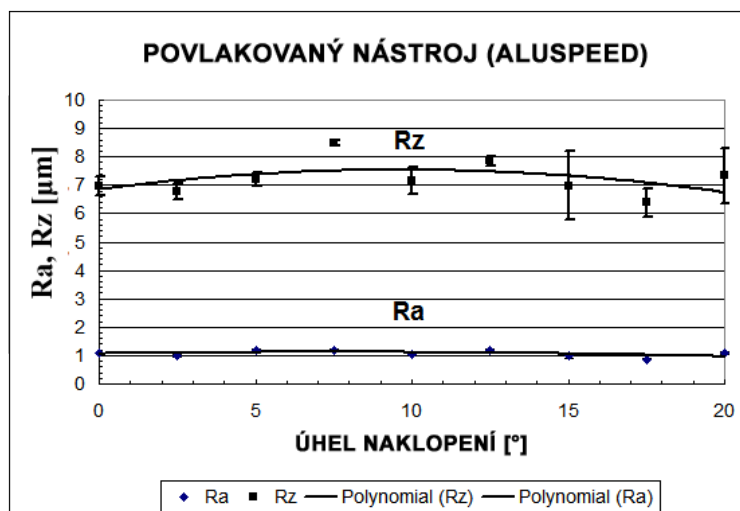


Obrázek 3.43: Průběhy složek silového zatížení při verifikaci empirického modelu.

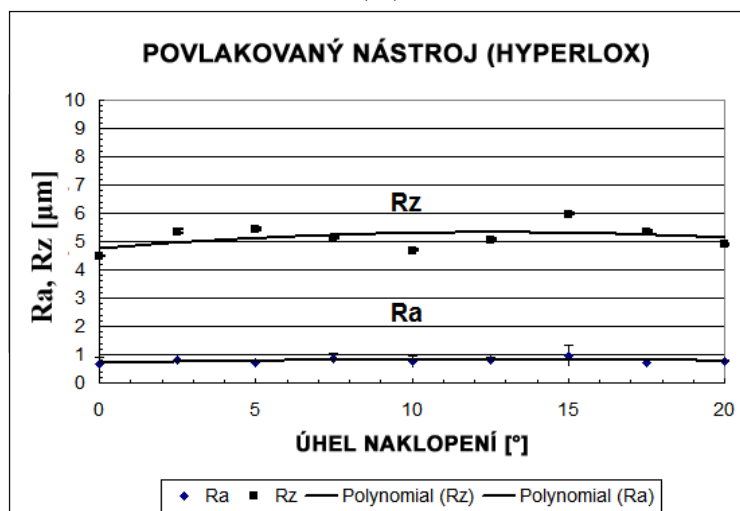


Obrázek 3.44: Koeficienty  $k_{FcN}$  a  $k_{Fp}$  vyjadřující velikost normálové řezné síly a pasivní síly.

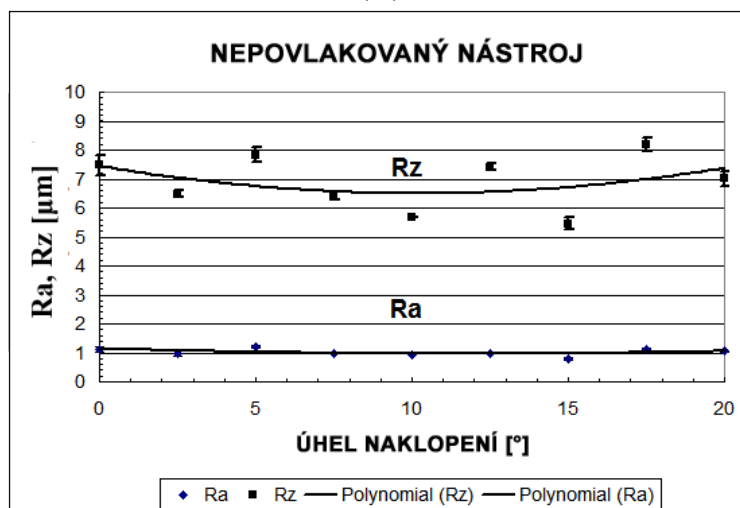
### 3. TESTOVÁNÍ NÁSTROJŮ PRO SPECIFICKÉ PODMÍNKY OBRÁBĚNÍ



(A)



(B)



(C)

Obrázek 3.45: Měřené parametry drsnosti povrchu.

### 3.4. Testování nástroje s VBD pro aplikaci obrábění HSS oceli

#### 3.4.1. Cíl experimentu

Cílem experimentálního testování bylo ověření aplikovatelnosti vyměnitelných břitových destiček (dále jen VBD) opatřených povlakem na bázi TiAlN pro obrábění nástrojové oceli zušlechtěné na horní mez pevnosti pomocí dlouhodobých zkoušek řezivosti, analýzy silového zatížení a metalografického studia PVD povlaků a substrátu. Dalším souvisejícím cílem je studium jevu opotřebení při frézování tvrdých materiálů a studium integrity povrchu s důrazem zejména na drsnost povrchu.

Tabulka 3.17: Přehled testovaných nástrojů a jejich označení.

Výrobce VBD	Druh povlaku	Označení povlakování nástroje	Počet použitých kusů v dávce	Počet experimentálních podmínek	Označení jednotlivých nástrojů v dávce
Pramet Tools	Ti <sub>x</sub> Al <sub>1-x</sub> N	1	9	3x3	1I, 1J, 1K, 1L, 1M, 1N, 1O, 1P
	Ti <sub>x</sub> Al <sub>1-x</sub> N	2	9	3x3	2I, 2J, 2K, 2L, 2M, 2N, 2O, 2P
	Ti <sub>x</sub> Al <sub>1-x</sub> N	3	9	3x3	3I, 3J, 3K, 3L, 3M, 3N, 3O, 3P

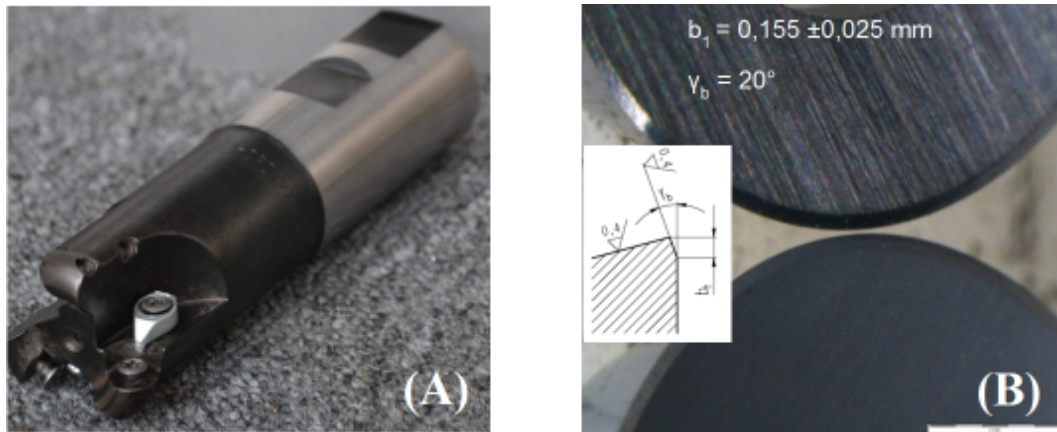
Souhrnně byly provedeny testy řezivosti pro devět nastavení experimentálních podmínek pro každý testovaný povlak, přičemž sestavení plánu experimentu bylo provedeno pomocí softwaru MiniTab 15. Celkově byly provedeny testy řezivosti devíti kusů VBD opatřených povlakem jednoho výrobce. Jména výrobců nejsou záměrně uvedena.

#### 3.4.2. Popis experimentu

##### Obráběcí stroj

K experimentálním zkouškám bylo použito vertikální obráběcí centrum TAJMAC – ZPS MCV 1210. Stroj je vybaven otočným dvouosým stolem (umožňuje pohyb v osách A a C) a řídicím systémem Sinumerik 840D, měřicí sondou obrobků OMP 400, měřicí sondou nástrojů NC4 (viz obr. 4.1) a vřetenem WEIS 176 024 s upínacím kuželem HSK – A63. Stroj je rovněž vybaven systémem pro automatickou výměnu nástrojů a dopravníkem třísek.

### 3. TESTOVÁNÍ NÁSTROJŮ PRO SPECIFICKÉ PODMÍNKY OBRÁBĚNÍ



Obrázek 3.47: (A) Frézovací nástroj pro VBD 25E3R065B32 - SRD12X, (B) VBD kruhového tvaru 12T3MOT (substrát ISO H15).



Obrázek 3.46: Vertikální obráběcí centrum MCV1210 s Ř.S. Sinumerik 840D.

#### Použité nástroje a analyzované povlaky

Použitým nástrojem byl frézovací nástroj s vyměnitelnými břitovými destičkami kruhového tvaru s negativní geometrií. Nástroj má možnost opatření třemi VBD, upevňovanými kombinovaně (viz obr. 4.2). VBD kruhového tvaru o průměru 12 mm, měly břit zesílený negativní fazetou (viz obr. 4.3) a před povlakováním byly upraveny mokřím pískováním.

Frézovací nástroj byl upnut do upínače typu Weldon o průměru 32 mm a umístěn do zásobníku nástrojů stroje ZPS MCV 1210. Během experimentálního testování nebylo pozorováno jakékoliv uvolnění nástroje, ani VBD.



### 3.4. TESTOVÁNÍ NÁSTROJE S VBD PRO APLIKACI OBRÁBĚNÍ HSS OCELI

Použité nástrojové povlaky jsou uvedeny v tab. 3.18 a byly vyrobeny dvěma výrobci povlaků, jejichž jména jsou záměrně neuvedena.

Tabulka 3.18: Parametry posuzovaných povlaků.

Ozn. nástr.	Složení	Struktura	Tvrdost [HV0,05/GPa]	Max. prac. teplota [°C]	Koef. tření [μm]	Tloušťka povlaku [μm]	Výrobce povlaku [-]
1	(Al <sub>0,6</sub> Ti <sub>0,4</sub> )N	nano-kompozitní	3700/-	1100	0,3	4-5,5	1
2	Al <sub>x</sub> Ti <sub>(1-x)</sub> N	nano-kompozitní	-/38,4	900	-	2-2,5	2
3	Al <sub>x</sub> Ti <sub>(1-x)</sub> N	nano-kompozitní	-/38,4	900	-	3-4	2

#### Řezné podmínky

Stanovení řezných podmínek bylo provedeno na základě doporučení výrobce, přičemž hodnoty doporučené výrobcem představovaly dolní meze posuvových rychlostí, použitých pro daný materiál. Tato volba byla provedena na základě předběžných obráběcích zkoušek realizovaných v průběhu přípravy experimentu. Výsledky těchto zkoušek byly použity pro stanovení řezných podmínek, jejichž přehled je uveden v tab. 3.19.



### 3. TESTOVÁNÍ NÁSTROJŮ PRO SPECIFICKÉ PODMÍNKY OBRÁBĚNÍ

Tabulka 3.19: Řezné podmínky pro testování nástrojů při testech řezivosti.

Řezná rychlost $v_c$ [m.min <sup>-1</sup> ]	Posuvová rychlost $v_f$ [mm.min <sup>-1</sup> ]	Posuv na zub $f_z$ [mm]	Šířka záběru ostří $a_p$ [mm]	Otáčky $n$ [min <sup>-1</sup> ]	Šířka frézované plochy $B$ [mm]
30	12,14	0,033	0,3	368	20
	19,50	0,053			
	26,86	0,073			
	11,78	0,033	0,45	357	
	18,92	0,053			
	26,06	0,073			
	11,55	0,033	0,60	350	
	18,55	0,053			
	25,55	0,073			
Chlazení/mazání		NE			
Druh frézování		Sousledé			
Kritérium opotřebení		Výskyt jevu (nadměrné chvění, vibrace, převýšení měřené síly 1000 N)			
Počet upnutých destiček		1			

#### Materiál obrobku

Obráběným materiálem byla rychlořezná ocel ČSN 41 9802.8 ( $R_{mo} = 3700$  MPa) označovaná RADECO, zpracovaná na horní mez pevnosti, tvrdost 64 HRC. Chemické složení a fyzikální vlastnosti jsou uvedeno v tab. 3.20 a tab. 3.21. Rozměry testovacího polotovaru 40 x 40 x 200 mm. Rovněž byla provedena analýza materiálu pomocí REM. Výsledky této analýzy jsou znázorněny v obr. 3.48.

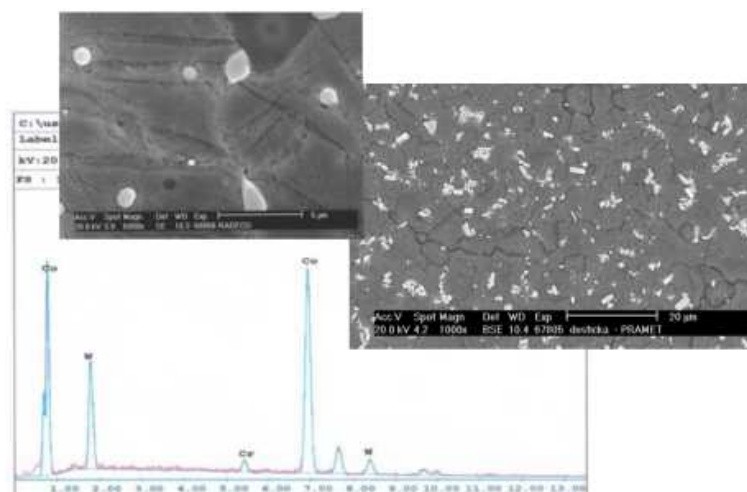
Tabulka 3.20: Chemické složení.

19 802.8 (EN 1.3339)	C	Mn	Si	P	S	Cr	Mo	W	V
	0,80 - 0,90	max. 0,45	max. 0,45	max. 0,035	max. 0,035	3,80 - 4,60	max. 0,50	9,50 - 11,00	2,00 - 2,70

Tabulka 3.21: Fyzikální vlastnosti.

Hustota $\rho$ [kg.m <sup>-3</sup> ]	Měrná tepelná kapacita $c_p$ [J.kg <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ]	Teplotní součinitel roztažnosti $\alpha$ [K <sup>-1</sup> ]	Tepelná vodivost $\lambda$ [W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ]	Konduktivita $\lambda$ [S.m <sup>-1</sup> ]
8200	-	-	-	-

### 3.4. TESTOVÁNÍ NÁSTROJE S VBD PRO APLIKACI OBRÁBĚNÍ HSS OCELI



Obrázek 3.48: Analýza materiálu 19802.8.

#### 3.4.3. Výběr faktorů a úrovní

Hlavním úkolem experimentálního měření bylo ověření aplikovatelnosti vyměnitelných břitových destiček (dále jen VBD) opatřených povlakem na bázi TiAlN pro obrábění nástrojové oceli zušlechtnuté na horní mez pevnosti a porovnání rozdílnosti jednotlivých modifikací povlaků.

V tabulce 3.22. je uveden přehled vstupních faktorů, jejich rozsah byl volen na základě přípravných (předběžných) experimentálních zkoušek, dále bylo také využito informací dostupných v odborné literatuře. Význam číselných úrovní faktorů označeného coat. koresponduje s označením jednotlivých povlaků v tab. 3.18.

Tabulka 3.22: Nastavitelné faktory a jejich úrovně (nekódované).

Ozn.	význam faktoru	Jedn.	dolní	střední	horní	Proměnná
Coat.	druh povlaku	[-]	1	2	3	ANO
f	posuv na zub	[mm]	0,033	0,053	0,073	ANO
$a_p$	axiální šířka záběru ostří	[mm]	0,3	0,45	0,6	ANO
$v_c$	řezná rychlost	[m.min <sup>-1</sup> ]	30,00			NE
B	šířka frézované plochy	[mm]	20			NE

#### 3.4.4. Volba odezvy

Měřenou odezvou v průběhu experimentálních zkoušek byla velikost silového zatížení působícího na nástroj.

V průběhu a po vykonání experimentálních zkoušek je možné snímat celou řadu parametrů, přičemž vzhledem k povaze experimentu byla snímána:

- drsnost povrchu vyjádřená parametry  $R_a$  a  $R_z$  [ $\mu\text{m}$ ].

### 3. TESTOVÁNÍ NÁSTROJŮ PRO SPECIFICKÉ PODMÍNKY OBRÁBĚNÍ

Dále bylo rozhodnuto sledovat stav třísek, jejich podobu, tvar a v případě změny vybraných sledovaných parametrů bylo rozhodnuto o provedení analýzy vybraných třísek na světelném mikroskopu.

#### 3.4.5. Plán experimentu

Zvoleným plánem experimentu byl faktoriální plán se třemi faktory a třemi úrovněmi.

Plán experimentu byl vytvořen za pomoci softwaru Minitab, který obsahuje nástroj pro plánování experimentu (ozn. DOE) pro plánování a následnou analýzu naměřených dat. Byla zvolena následující struktura plánu:

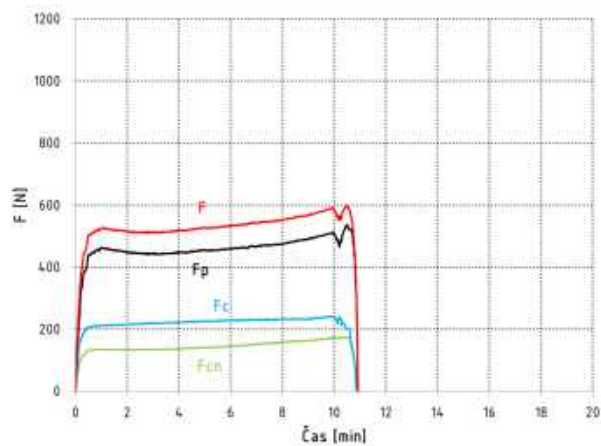
- jádro plánu je tvořeno plným faktoriálním plánem  $2^k$ , kde exponent  $k$  je roven dvěma posuzovaným faktorům. Jádro plánu pak obsahuje  $3^3 = 4$  měření bez replikací,
- centrální body  $n_c = 1$  (bez replikací),
- počet replikací  $n = 3$ .

Počet měření včetně replikací je roven  $N = ((4 + 1) \cdot 3) = 15$ . Počet replikací byl zvolen s ohledem na možnost následného testování adekvátnosti modelu a zvýšení spolehlivosti výsledků.

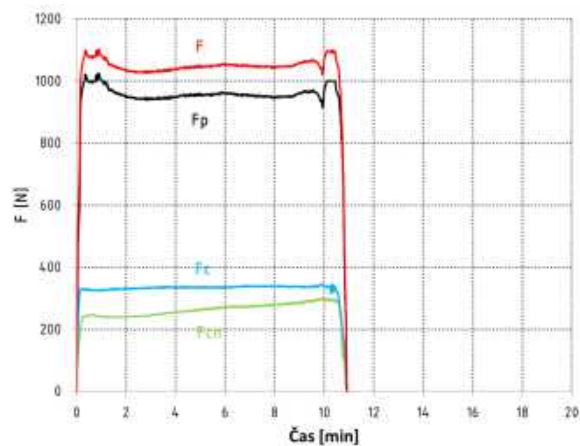
#### 3.4.6. Statistická interpretace výsledků

Zpracování naměřených hodnot bylo prováděno v souladu s metodikou popsanou v kapitole 3.1. Vzhledem k rozsáhlosti experimentu a velkému množství datových řad zde bude uvedeno pouze zpracování dat pro jedny podmínky ( $v_c = 30 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ ,  $f_z = 0,033 \text{ mm}$ ,  $a_p = 0,3 \text{ mm}$ ,  $n = 368 \text{ min}^{-1}$ ). U dalších budou uvedeny pouze dosažené výsledky. V grafických znázorněních jednotlivých silových složek (3.49 až 3.51) je vidět, že doba jednoho měření byla více než 660 s (dle použitých rezných podmínek). Obráběním materiálu 19802.8 s velmi špatnou obrobiteľností narůstá opotřebení nástroje (potažmo i silové zatížení) velmi rychle. Z datových řad silového zatížení byly odstraněny náběhy a přeběhy, a tímto způsobem byla získána separovaná data. V separovaných intervalech hodnot byla testována hypotéza o normalitě datových řad, která byla zamítnuta na hladině významnosti  $\alpha = 0,05$  - pro nástroje nové (viz 3.52 (A)) a následně i pro nástroje opotřebované (viz 3.52 (B)).

### 3.4. TESTOVÁNÍ NÁSTROJE S VBD PRO APLIKACI OBRÁBĚNÍ HSS OCELI

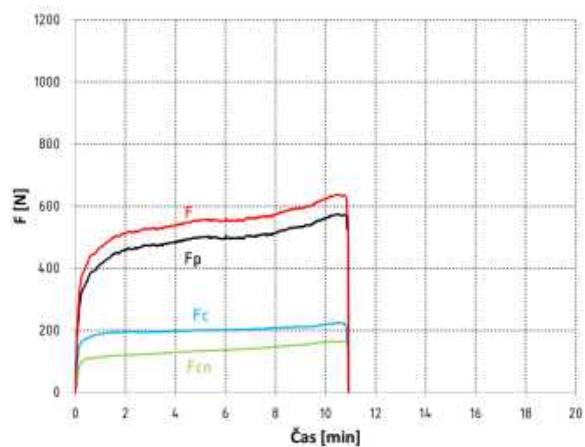


(A) Nástroj 1I - začátek frézování.

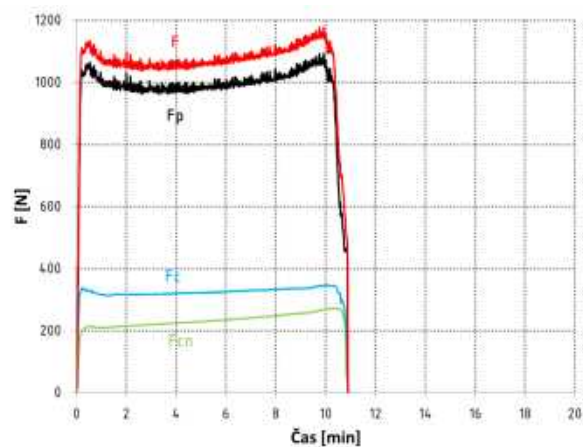


(B) Nástroj 1I - konec frézování.

Obrázek 3.49: Průběh silových složek nástroje 1I (A, B).



(A) Nástroj 2I - začátek frézování.



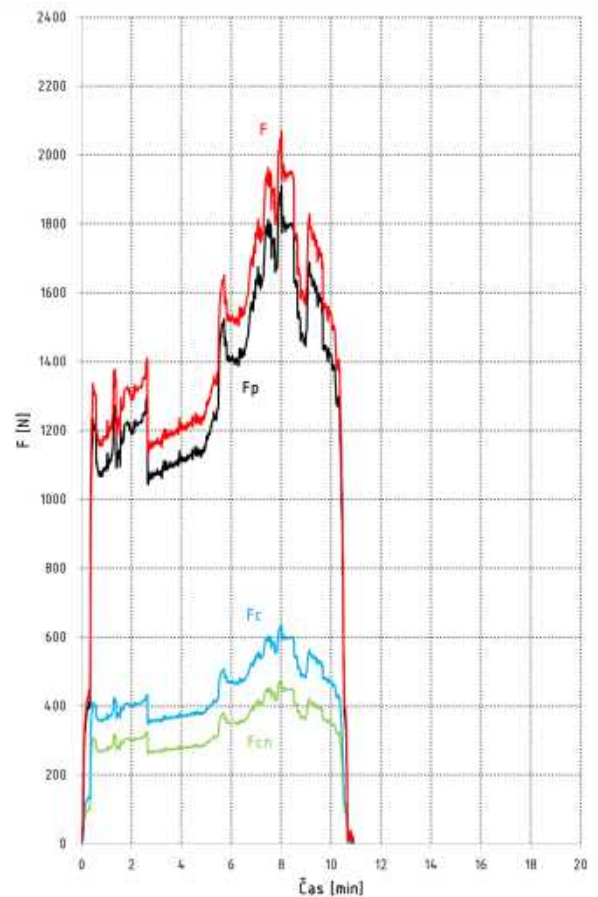
(B) Nástroj 2I - konec frézování.

Obrázek 3.50: Průběh silových složek nástrojů 2I (A, B).

### 3. TESTOVÁNÍ NÁSTROJŮ PRO SPECIFICKÉ PODMÍNKY OBRÁBĚNÍ

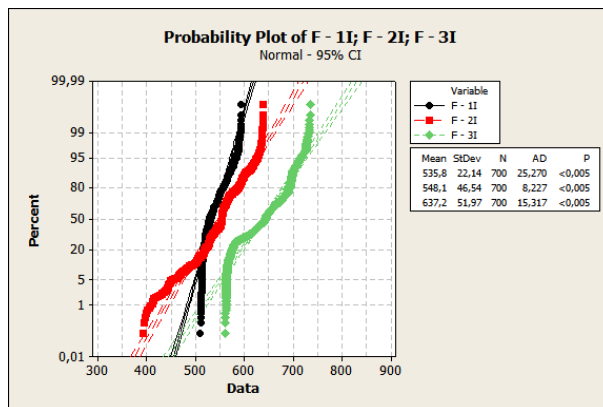


(A) Nástroj 3I - začátek frézování.

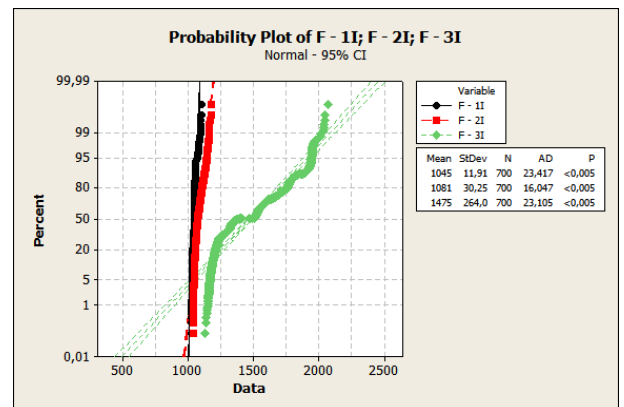


(B) Nástroj 3I - konec frézování.

Obrázek 3.51: Průběh silových složek nástrojů 3I (A, B).



(A) začátek frézování.



(B) konec frézování.

Obrázek 3.52: Test normality pro nástroje 1I, 2I, 3I.

Vzhledem ke zjištěné nenormalitě dat bylo přistoupeno k neparametrickému testu hypotéz o rovnosti mediánů – Kruskal – Wallis, která byla zamítnuta na hladině  $\alpha = 0,05$  pro nástroje nové (3.23 (A)) i nástroje opotřeбенé (3.23 (B)).

Z časových závislostí rozvoje sil (3.49 (A) až 3.51 (B)) je možné usoudit, že nejnižší hladiny silového zatížení na začátku frézování bylo dosaženo s nástrojem s povlakem 2

### 3.4. TESTOVÁNÍ NÁSTROJE S VBD PRO APLIKACI OBRÁBĚNÍ HSS OCELI

(přibližně 400 – 600 N, medián 526,511 N), nejvyšší při obrábění s nástrojem s povlakem 3 (přibližně 600 – 800 N, medián 642,301 N). Nástroj s povlakem 1 vykazoval na začátku frézování nejnížší směrodatnou odchylku a rozptyl hodnot (viz Tab. 4.10). Provedenými analýzami bylo prokázáno, že je mezi posuzovanými daty statisticky významný rozdíl.

Tabulka 3.23: Výsledky testu Kruskal-Wallis pro nástroje 1I, 2I, 3I (A) nové, (B) opotřebené.

Kruskal-Wallis Test: F versus NÁSTROJ

Kruskal-Wallis Test on F

NÁSTROJ	N	Median	Ave Rank	Z
1I	700	527,3	621,9	-22,90
2I	700	553,2	864,9	-9,92
3I	700	642,3	1664,7	32,82
Overall	2100		1050,5	

H = 1133,43 DF = 2 P = 0,000

(A)

Kruskal-Wallis Test: F versus NÁSTROJ

Kruskal-Wallis Test on F

NÁSTROJ	N	Median	Ave Rank	Z
1I	700	1046	419,6	-33,72
2I	700	1073	982,2	-3,65
3I	700	1396	1749,7	37,36
Overall	2100		1050,5	

H = 1697,47 DF = 2 P = 0,000

H = 1697,47 DF = 2 P = 0,000 (adjusted for ties)

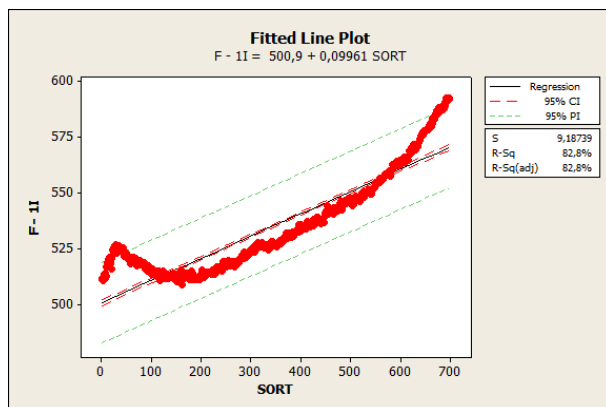
(B)

Bylo zjištěno, že nástroj 1 v průběhu frézování (i po vyčerpání řezivosti) byl podstatně stabilnější z pohledu silového zatížení než nástroje 2 a 3, což bylo potvrzeno i statistickou analýzou. U povlakovaného nástroje 3 došlo za daných podmínek k rychlému vyčerpání řezivosti nástroje (viz Obr. 4.23 a Obr. 4.24 – 3I). Hodnoty popisující datové řady na začátku a na konci frézování jsou uvedeny v tab. 4.10.

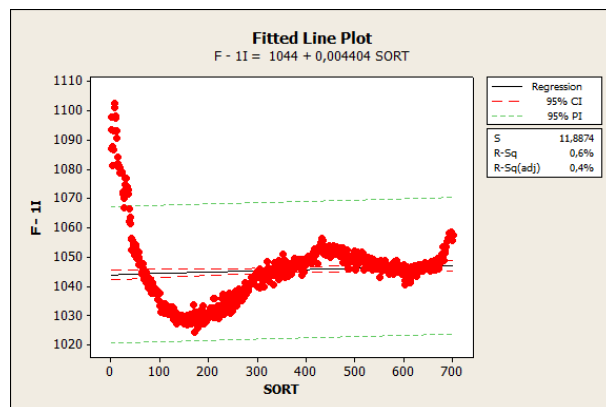
Nástroje 1 a 2 dosáhly shodné trvanlivosti (28,4 minut) a stejného množství odebraného materiálu (97,2 cm<sup>3</sup>). Hodnoty trvanlivosti všech posuzovaných nástrojů jsou uvedeny na Obr. 4.23, který ovšem nezohledňuje rozdílnost řezných podmínek, proto jsou doplněny o grafické znázornění závislosti typu nástroje na objemu odebraného materiálu (Obr. 4.24).

Při opotřebení nástrojů dochází k nárůstu celkového silového zatížení, a tím i k nárůstu energetické náročnosti obrábění. Proto posuzovaná data vykazují vždy určitý trend. U datových řad bylo tedy posuzováno, zda je tento trend statisticky významný či nikoliv. U všech posuzovaných nástrojů (nových i opotřebených) bylo prokázáno, že je trend statisticky významným (Tab. 4.8, Tab. 4.9). Výsledky analýzy trendu v grafické podobě pro nové i opotřebené nástroje jsou znázorněny na Obr. 4.14 až Obr. 4.19.

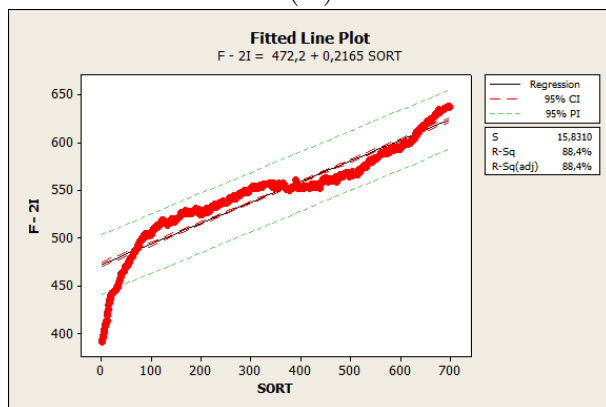
### 3. TESTOVÁNÍ NÁSTROJŮ PRO SPECIFICKÉ PODMÍNKY OBRÁBĚNÍ



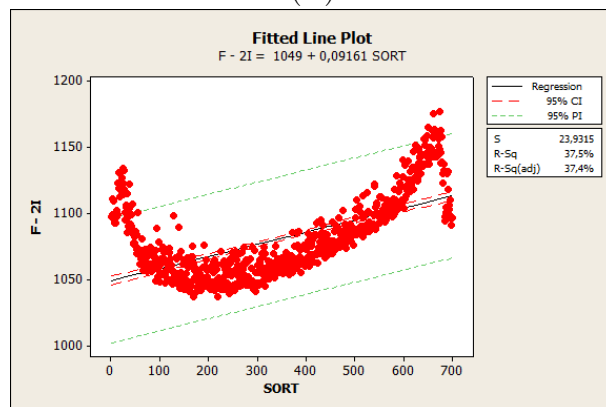
(A)



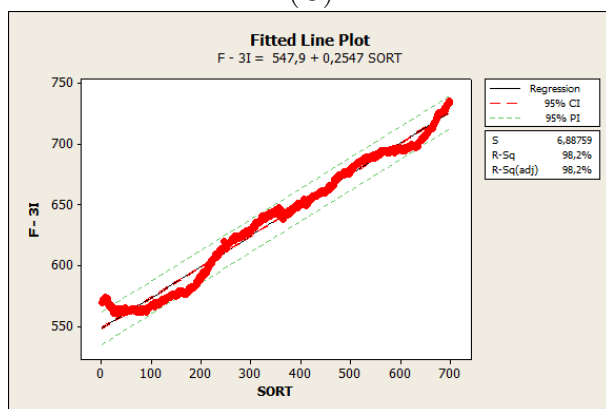
(B)



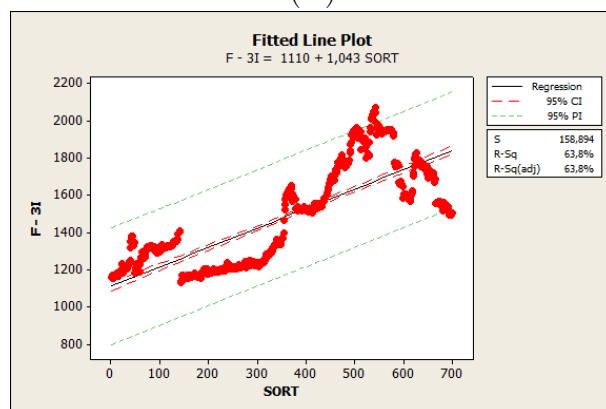
(C)



(D)



(E)



(F)

Obrázek 3.53: Analýza trendu pro nástroje nové (A, C, E), opotřebené (B, D, F).



### 3.4.7. Zhodnocení a diskuse dosažených výsledků

Provedené testy byly primárně zaměřeny na testování vhodnosti/nevhodnosti VBD opatřených povlaky na bázi  $\text{Al}_x\text{Ti}_{1-x}\text{N}$  od různých výrobců pro obrábění nástrojové rychlořezné oceli s tvrdostí 64 HRC (1.3318). Provedené experimentální testy byly provedeny za různých řezných podmínek. Použitý držák VBD má negativní geometrii, přičemž VBD má negativní geometrii a břit VBD je zesílen negativní fazetou, jejíž geometrie je znázorněna na **obr. 4.3**.

Při obrábění nástrojových ocelí bylo zjištěno, že nejlepších výsledků u trvanlivosti nástrojů je dosahováno pro posuv na zub v rozsahu ( $f_z = 0,05 - 0,1 \text{ mm}$ ) [19]. Tyto informace dále rozšířil Koshy [23], který dosáhl nejlepších parametrů s nastavením posuvu na zub  $f_z = 0,1 \text{ mm}$  a s nastavením řezné rychlosti v oblasti od  $25 - 50 \text{ m.min}^{-1}$ , pro nástrojovou ocel AISI D2 (58 HRC).

Pro obráběnou nástrojovou rychlořeznou ocel 19 802.8 (64 HRC), byla testována nastavení řezné rychlosti v oblasti od  $25 - 40 \text{ m.min}^{-1}$ , přičemž nejlepších výsledků bylo dosaženo při rychlosti  $30 \text{ m.min}^{-1}$ . V průběhu studia tématiky se autor nesetkal v odborných člancích s posouzením vlivu šířky záběru ostří a posuvu na trvanlivost nástroje při obrábění rychlořezných ocelí. Rovněž zdroje zabývající se problematikou obrábění rychlořezných ocelí za použití nástrojů ze SK jsou velmi omezené, proto bylo rozhodnuto se touto problematikou zabývat.

Pro zjištění rozsahu posuvů na zub vhodných pro experiment bylo testováno různé nastavení hodnot posuvů ( $f_z = 0,10 \text{ mm}$ ,  $0,15 \text{ mm}$  a  $0,20 \text{ mm}$ ), při zachování řezné rychlosti  $30 \text{ m.min}^{-1}$  – přičemž u posuvů  $f_z > 0,15 \text{ mm}$  došlo k destrukci břitu VBD. Tato skutečnost je přisuzována překročení délky negativní fazetky zesilující břit. Pro posuv  $f_z = 0, 10 \text{ mm}$  došlo k vylomení břitu po obrobení délky  $20 \text{ mm}$ . Tato skutečnost je připisována velmi vysokým měrným silám, působícím na břit nástroje.

Proto veškeré obrábění během experimentálních testů bylo prováděno zásadně v oblasti negativní fazety a zvolený rozsah pro experimentální zjištění vlivu šířky záběru ostří a posuvu na trvanlivost nástroje byl ( $f_z = 0,033 - 0,073 \text{ mm}$ ), v rozsahu  $a_p$  ( $0,3 - 0,6 \text{ mm}$ ).

Analýzou řezných nástrojů před započítáním experimentálních testů bylo zjištěno:

- u všech posuzovaných povlaků byla pozorována velmi jemnozrná struktura (s velikostí pod  $0,02 \text{ }\mu\text{m}$ ),
- zjištěná tloušťka PVD povlaku u nástroje 1 ( $4 \pm 1 \text{ }\mu\text{m}$ ), nástroje 2 ( $2 - 3 \text{ }\mu\text{m}$ ), nástroje 3 ( $3 - 4 \text{ }\mu\text{m}$ ), přičemž tloušťka povlaku byla ovlivněna směrovým efektem při PVD povlakování – největší tloušťka povlaku na hřbetě, nejmenší na čele nástroje,
- byla pozorována pravidelná distribuce karbidů, nízká pórovitost v substrátu a velmi jemnozrná struktura (velikost karbidů  $< 1 \text{ }\mu\text{m}$ ).



### 3. TESTOVÁNÍ NÁSTROJŮ PRO SPECIFICKÉ PODMÍNKY OBRÁBĚNÍ

Pro experimentální testy byla použita metodika měření silového zatížení nástrojů v časových závislostech. Tímto způsobem byly sledovány specifické veličiny popisující rozvoj opotřebení bez nutnosti přerušení experimentů.

#### Silové zatížení nástroje

Analýza silového zatížení byla provedena dle algoritmu naznačeného v kapitole 3.1. Z průběhů silového zatížení je na první pohled zřejmé, že dominantní složkou není síla řezná, nýbrž síla pasivní. Stejných výsledků při aplikaci tvarových nástrojů (s kulovým čelem, toroidních fréz, v VBD s půlkruhovými čelními břity) z hlediska poměrů složek silového zařízení bylo dosaženo dle 5 při obrábění nástrojové oceli AISI D2 o tvrdosti 63HRC, a při obrábění oceli X155CrVMo12-1 o tvrdosti 60 HRC 32. Stejných poměrů silových složek bylo dokonce dosaženo i při obrábění materiálu GS45 (ČSN 42 2643 – ocel na odlitky uhlíková) [8].

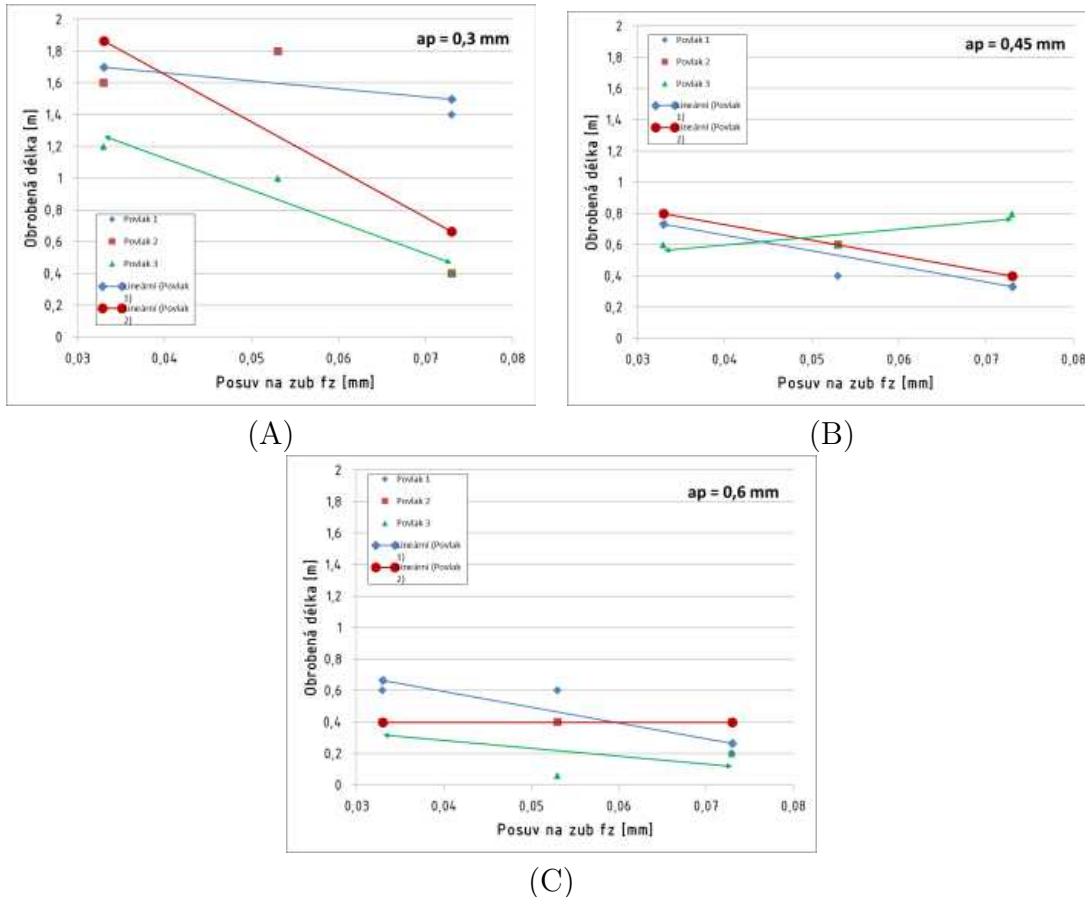
Řezná síla  $F_c$  se pohybovala v rozsahu (35 – 45%  $F_p$ ) a normálová řezná síla v rozsahu (30 – 35%  $F_p$ ). Z této skutečnosti vyplývá, že materiál nebyl břítem odřezán, ale víceméně odstraněn v důsledku porušení soudržnosti materiálu vysokým silovým zatížením (tlakem). Pravděpodobně tedy podobným mechanismem, ke kterému dochází při tváření materiálu. Autoři, kteří dosáhli stejných poměrů silových složek [8, 49, 50] se tímto jevem dále nezabývali, ani ho nerozváděli. Důvody tohoto chování by bylo třeba objasnit dalšími experimentálními testy a analýzami.

#### Trvanlivost nástroje

Chování nástrojů 1, 2, 3 povlakovaných AlTiN pro šířku záběru ostří  $a_p = 0,3$  mm znázorňuje 3.54 - závislost posuvu na zub na celkové obrobené délce. Trend získaný pomocí lineární regrese ukazuje, že nejlepších výsledků je dosahováno při nejmenším posuvu na zub. Z grafické závislosti je zřejmé, že mezi jednotlivými povlaky jsou patrné rozdíly v jejich trvanlivosti, zejména při vyšších posuvových rychlostech. Z 3.54 (B) ( $a_p = 0,45$  mm) je zřetelné, že mezi výsledky dosaženými nástroji 1 a 2 je nepatrný rozdíl a mají klesající trend, nástroj 3 má trend rostoucí a dosahuje nejvyšší trvanlivosti při nejvyšší nastavené hodnotě posuvu. Pro největší šířku záběru ostří  $a_p = 0,60$  mm je zjištěný trend pro všechny nástroje klesající (3.54), přičemž hodnoty trvanlivosti vyjádřené v obrobené délce dosahovaly nejnižších hodnot ze všech posuzovaných šířek záběru ostří ( $a_p$ ).

Ve srovnání s výsledky [23], bylo dosaženo přibližně 10 krát nižší trvanlivosti než v případě obrábění oceli ANSI D2 (58 HRC). Toto je přisuzováno množství velmi tvrdých karbidů chromu, které jsou zodpovědné za vysokou odolnost obráběného nástrojového materiálu [23], a způsobují jeho velmi obtížnou obrobitelnost (oceli 19 802.8 – 64 HRC). Na zjištěné poměry silových složek měla určitý vliv rovněž negativní geometrie nástroje.

### 3.4. TESTOVÁNÍ NÁSTROJE S VBD PRO APLIKACI OBRÁBĚNÍ HSS OCELI



Obrázek 3.54: Trvanlivost nástrojů s povlakem 1, 2, 3 jako funkce posuvu na zub, pro (A)  $a_p = 0,30 \text{ mm}$ , (B)  $a_p = 0,45 \text{ mm}$ , (C)  $a_p = 0,60 \text{ mm}$ .

Všechny nástroje v průběhu frézování vykazovaly vylamování břitů, přičemž včasné odhalení částečného vylomení břitů zabránilo katastrofickému porušení s následkem vylomení celého břitu. Tato skutečnost opět potvrzuje domněnku, že materiál byl během obrábění odstraňován více „tvářením“ než odřezáváním, jak bylo zmíněno výše v textu – potvrdit a objasnit toto chování by bylo třeba dalšími analýzami.

Provedené testy prokázaly:

- VBD s povlakem  $\text{Al}_{0,6}\text{Ti}_{0,4}\text{N}$  (nástroj 1) bylo odebráno  $97,2 \text{ cm}^3$  materiálu při trvanlivosti 28,4 minut pro řezné podmínky:  $a_p = 0,3 \text{ mm}$ ,  $f_z = 0,053 \text{ mm}$ ;  $76,8 \text{ cm}^3$  při trvanlivosti 43,1 minut ( $a_p = 0,3 \text{ mm}$ ,  $f_z = 0,033 \text{ mm}$ );  $58,8 \text{ cm}^3$  při trvanlivosti 17,1 minut ( $a_p = 0,3 \text{ mm}$ ,  $f_z = 0,073 \text{ mm}$ ) a bylo tak potvrzeno, že se jedná o nejodolnější povlak při dané aplikaci,
- VBD s povlakem  $\text{Al}_x\text{Ti}_{1-x}\text{N}$  - tenkým (nástroj 2) bylo odebráno  $97,2 \text{ cm}^3$  materiálu při trvanlivosti 28,4 minut pro řezné podmínky:  $a_p = 0,3 \text{ mm}$ ,  $f_z = 0,053 \text{ mm}$ ;  $76,8 \text{ cm}^3$  při trvanlivosti 43,1 minut ( $a_p = 0,3 \text{ mm}$ ,  $f_z = 0,033 \text{ mm}$ ),
- VBD s povlakem  $\text{Al}_x\text{Ti}_{1-x}\text{N}$  - silným (nástroj 3) bylo odebráno  $43,2 \text{ cm}^3$  materiálu při trvanlivosti 32,3 minuty pro řezné podmínky:  $a_p = 0,3 \text{ mm}$ ,  $f_z = 0,033 \text{ mm}$ .

### 3. TESTOVÁNÍ NÁSTROJŮ PRO SPECIFICKÉ PODMÍNKY OBRÁBĚNÍ

Nejvyšší dosažená trvanlivost byla pozorována při šířce záběru ostří  $a_p = 0,3$  mm a posuvové rychlosti  $f_z = 0,053$  mm – reprezentována obrobenou délkou 1,8 m.

#### Drsnost povrchu

Při obrábění velmi tvrdých nástrojových materiálů tvarovými nástroji bylo dosaženo drsností povrchu v rozsahu ( $R_a$  0,25 – 5  $\mu\text{m}$ ). Při frézování oceli X210Cr12 – 62 HRC bylo dosaženo  $R_a$  (1  $\mu\text{m}$ ) pro nástroj ze slinutého karbidu s PVD povlakem TiAlN po odebrání 1200 mm<sup>3</sup> materiálu [51]. Frézováním oceli ANSI D2 bylo dosaženo drsnosti povrchu pro nástroj s VBD neopotřeбенý v rozsahu  $R_a$  (1,5 – 2,0  $\mu\text{m}$ ), pro opotřeбенý  $R_a$  (2,5 – 5,0  $\mu\text{m}$ ) [23].

Rozvoj hřbetního opotřeбенí prochází třemi fázemi [16]. Nejlepších parametrů drsnosti bývá obvykle dosahováno ve fázi II, kdy je nástroj v oblasti lineárního opotřeбенí s konstantní intenzitou, což bylo potvrzeno i při obrábění nástrojových ocelí dle testů [51, 52].

V průběhu experimentů se parametry drsnosti povrchu pohybovali v rozmezí ( $R_a$  0,1 – 0,6  $\mu\text{m}$ ) a  $R_z$  v rozmezí (0,5 – 2,5  $\mu\text{m}$ ). Grafické znázornění průběhu parametrů drsnosti povrchu je uvedeno na Obr. 4.29 až Obr. 4.31. V porovnání s výsledky dosažené v [23, 51, 52] se jedná o významně lepší výsledky. Podobných hodnot bylo dosaženo pro nástroj z CNB18. Tato skutečnost byla způsobena jednak rozdíly řezných podmínek a obráběných materiálů, ale zejména se dá přisoudit velmi nízkým posuvům na zub použitým během obrábění ( $f_z = 0,033$  – 0,073 mm). Obrábění takto nízkými posuvovými rychlostmi je však nevhodné pro produkční obrábění vzhledem ke značné časové náročnosti.



## 4. Závěry

### Testování frézovací hlavy s VBD pro HSC obrábění Al slitin

Byly provedeny dlouhodobé testy řezivosti vyměnitelných břitových destiček (ADEX 160608FR-FA) ze slinutého karbidu HF7 (WC (93) + Co (7) s průměrnou velikostí karbidických částic  $0,8 \mu\text{m}$ ) od výrobce Pramet Tools, s.r.o, pro dodaný obráběný materiál AlSi9Cu3(Fe) (ČSN 42 4339) byl pro všechny VBD zvolena konstantní řezná rychlost ( $1100 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ ) a posuvová rychlost ( $250 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ ). Dodaná výchozí frézovací hlava s geometrií lůžka vyměnitelné břitové destičky (radiální úhel čela  $\gamma_f = -2^\circ$ , axiální úhel čela  $\gamma_f = +12^\circ$ ) způsobovala otěr hřbetní plochy VBD o obráběnou plochu a bylo pozorováno přilnutí obráběného materiálu na hřbetní ploše. Proto byla realizována změna geometrie lůžka čelní frézovací hlavy na hodnoty - radiální úhel čela  $\gamma_f = -7^\circ$ , axiální úhel čela  $\gamma_f = +8^\circ$ , která se osvědčila.

**Z provedené studie řezivosti uvedených posuzovaných vyměnitelných břitových destiček vyplývají tato shrnutí a závěry:**

#### a) z hlediska opotřebení:

- dominantním vlivem způsobujícím opotřebení při obrábění AlSi9Cu3(Fe) je abrazivní opotřebení,
- na hřbetní ploše VBD po úpravě geometrie lůžka čelní frézovací hlavy nebyl pozorován otěr hřbetní plochy o obráběnou plochu,
- po úpravě geometrie lůžka frézovací hlavy došlo k odstranění otěru hřbetní plochy o obráběnou plochu a redukci vzniku nárůstků (o 40%),
- u všech VBD byl pozorován adhezně přilnutý materiál na čele VBD, a to v kontaktní oblasti rozhraní čelo-tříska, u výchozí i upravené geometrie lůžka čelní frézovací hlavy,
- po šestnácti minutách obrábění vykazoval nejnižší hřbetní opotřebení povlak AluSpeed ( $VB = 21 \mu\text{m}$ ) a nejvyšší povlak Tripple Alwin ( $VB = 61 \mu\text{m}$ ),
- u VBD s povlakem Darwin došlo k odlomení špičky nástroje pro obě posuzované geometrie,

#### **b) z hlediska silového zatížení:**

- statisticky významný rozdíl mediánu řezných sil na hladině významnosti  $\alpha = 0,05$  mezi všemi posuzovanými povlaky (AluSpeed, Darwin, Tripple Alwin), přičemž nejlepšího výsledku (nejnižšího silového zatížení) pro upravenou geometrii lůžka čelní frézovací hlavy bylo dosaženo s VBD s povlakem AluSpeed,
- úpravou geometrie lůžka čelní frézovací hlavy bylo významně redukováno kolísání silového zatížení (o 15%), potažmo i tvorba nárůstků na hřbetě VBD,

#### **c) z hlediska řezného výkonu:**

- pro výchozí geometrii lůžka čelní frézovací hlavy byl nejvyšší řezný výkon 2,4kW se směrodatnou odchylkou 0,14 zjištěn pro VBD s povlakem Darwin,
- na intervalu šestnácti minut došlo k nárůstu řezného výkonu o 3% (Tripple Alwin) až 46,5% (Darwin) pro výchozí geometrii lůžka čelní frézovací hlavy, nejvyšší řezný výkon 4,38 kW pro VBD bez povlaku,
- pro upravenou geometrii lůžka čelní frézovací hlavy došlo na intervalu šestnácti minut k nárůstu řezného výkonu o 10,0% (Darwin) až 14,5% (bez povlaku),
- a byl pozorován nárůst řezného výkonu od 8% do 12%, přičemž nejvyšší řezný výkon byl shodně u povlaku Darwin a u povlaku AluSpeed (medián 3,6 kW).

## **Testování fréz s kulovým čelem**

### **Obrábění HSS oceli**

Testování bylo zaměřeno na ověření aplikovatelnosti VBD pro obrábění HSS oceli zušlechťené na horní mez pevnosti. Cílem bylo zejména stanovit závislosti zahrnující vliv povlaku, posuvové rychlosti, a šířky záběru ostří na trvanlivost nástroje, velikost silového zatížení a na drsnost obrobeného povrchu. Experimentální testy byly koncipovány jako dlouhodobé zkoušky. Tvorba a odvod třísek během testování probíhaly bez problémů, provedené analýzy všech nástrojů prokázaly:

- statisticky významný rozdíl mezi neopotřeбенými i opotřeбенými VBD s povlaky 1, 2, 3 na hladině významnosti  $\alpha = 0,05$ ,
- větší opotřebení nástroje způsobuje vyšší rozptyl hodnot silového zatížení ve všech složkách (do 200%),

- frézováním oceli 19 802.8 ve zušlechtěném stavu (64 HRC) bylo dosaženo hodnot trvanlivosti nástrojů  $< 2$  m celkové obrobene délky,
- analýza hřbetního opotřebení prokázala vylamování břitu a ulpívání obráběného materiálu na všech hladinách nastavení hodnot posuvu na zub ( $f_z = 0,033 - 0,073$  mm) a šířek záběrů ostří ( $a_p = 0,3 - 0,6$  mm),
- byly pozorovány nepatrné rozdíly hodnot drsnosti povrchu pro nástroje ze SK pro všechny typy posuzovaných povlaků (v rozsahu  $R_a$  ( $0,1 - 0,6 \mu\text{m}$ ),  $R_z$  ( $0,5 - 2,5 \mu\text{m}$ )),
- u povlakovaných nástrojů 2, 3 opatřených stejným povlakem (AlTiN) různé tloušťky se projevily opačný efekt tloušťky povlaku – silnější povlak = nižší trvanlivost (Obr. 4.23, Obr. 4.24, Obr. 5.2, Obr. 5.3),
- provedené testy potvrdily dobrou korelaci mezi silovým zatížením a trvanlivostí nástroje – za stejných řezných podmínek znamenalo nižší silové zatížení delší trvanlivost nástroje,
- pro danou aplikaci je striktně doporučeno nepřekračovat délku negativní fazety.

## Testování nástrojů pro víceosé obrábění

Testování bylo zaměřeno na zjištění vlivu naklopení nástroje a nástrojového povlaku na parametry drsnosti obrobeneho povrchu. Experimentální testy byly koncipovány jako krátkodobé. Tvorba a odvod třísek probíhaly bez problémů, provedené statistické analýzy za stanovených podmínek obrábění prokázaly:

- nejnižších hodnot měrné řezné síly  $k_c = 505,25\text{N}$  až  $513,89\text{N}$  bylo dosaženo pro naklopení nástroje  $\beta = 10^\circ$ , naopak nejvyšších hodnot  $k_c = 602,2\text{N}$  až  $629,0\text{N}$  bylo dosaženo pro naklopení nástroje  $\beta = 0^\circ$ ,
- nejnižších hodnot parametru drsnosti  $R_a < 0,8$  a  $R_z < 5$  bylo dosaženo pro naklopení nástroje v rozsahu  $\beta = 5^\circ$  až  $15^\circ$  pro nástroj s povlakem  $\text{TiB}_2$ ,
- nejvyšších hodnot parametru drsnosti  $R_a > 1,1$  bylo dosaženo pro naklopení nástroje  $\beta = 0^\circ$  pro nástroj bez povlaku,
- nejvyšších hodnot parametru drsnosti  $R_z > 7$  bylo dosaženo pro naklopení nástroje v rozsahu  $\beta = 20^\circ$ ,
- povlak na bázi  $\text{TiB}_2$  je nejvhodnějším povlakem pro danou aplikaci z hlediska dosažené drsnosti povrchu i z hlediska velikosti měrné řezné síly,

Z uvedených skutečností vyplývá, že pokud dovolují podmínky obrábění držet stálý odklon nástroje cca  $10^\circ$ , budou dosaženy nejlepší parametry drsnosti povrchu a současně i nejnižší měrné silové zatížení v průběhu obrábění. Tato skutečnost bude mít v důsledku pozitivní vliv i na trvanlivost nástroje.

Přínosem disertační práce je aplikace metod plánovaného experimentu (DOE) do oblasti testování nástrojů pro obrábění na víceosých obráběcích centrech. Využitím metod plánovaného experimentu bylo dosaženo snížení časové i finanční náročnosti testů. Dále byla úspěšně ověřena aplikovatelnost těchto metod pro tuto oblast experimentování a přitom se podařilo získat potřebné informace o vlastnostech řezných nástrojů potažmo nástrojových povlaků.

Všechny uvedené práce byly prováděny na základě požadavku tří tuzemských podniků (zabývajících se PVD povlakováním, výrobou řezných nástrojů), přičemž výsledky byly aplikovány přímo v praxi. Byly testovány rovněž některé vývojové typy povlaků, přičemž u některých provedené experimentální testy prokázaly nevhodnost sériové produkce. Výsledky byly prezentovány v rámci prezentací pro jednotlivé výrobce, na národních i mezinárodních konferencích.



# Perpektiva dalších prací

Budoucí vývoj testování řezných nástrojů a zkracování intervalu mezi vývojem a uvedením nového nástroje či povlaku na trh, bude klást vyšší a vyšší nároky na užívání metod plánovaného experimentu, které dokážou dobu experimentování značně zkrátit při současném zachování věrohodnosti výsledků. Navazující práce mohou být zaměřeny například na možnosti monitorování aktuálního opotřebení nástrojů přímo v procesu obrábění, a to i v podmínkách praxe, například za využití metody sound mapping a pojednání o možnostech jeho implementace do praxe. Automatické monitorování stavu nástroje by opět posunulo snahy o plně automatizované obrábění kupředu.

Dále by bylo možné navázat na úrovni zpracování signálů získaných z dynamometru a využít tak plně možnosti porovnání dynamického chování nástrojů v obráběcím procesu s dynamickými vlastnostmi získanými analýzou dynamické stability nástrojů pomocí akcelerometrů.



# Literatura

- [1] AVALLONE, E.A., BAUMEISTER, T. a SADEGH, A.. M. Marks Standard Handbook for Mechanical Engineers. 2007. McGraw-Hill. 1800 s. ISBN 978-0-07142-867-5.
- [2] BRANDAO, L.C., COELHO, R.T. a RODRIGUES, A.R. Experimental and theoretical study of workpiece temperature when end milling hardened steels using (TiAl)N-coated and PcBN-tipped tools. *Journal of materials processing technology*. 2005, **Vol. 162-163**, pp. 696-7010924-0136.
- [3] MAREK, J. *Konstrukce CNC obráběcích strojů* 2. MM publishing, 2010. 420 s. ISBN 978-80-254-7980-3.
- [4] IKUA, Bernard. W., TANAKA, H., OBATA, F. a SAKAMOTO, S. Prediction of cutting forces and machining error in ball end milling of curved surfaces - I theoretical analysis. *Materials in engineering*. 2001, **Vol. 25/4**, pp. 266-2730141-6359.
- [5] KIM, G.M. a CHU, C.N. Cutting force prediction of sculptured surface ball-end milling using Z-map. *International journal of machine tools*. 2000, **Vol. 40/2**, pp. 277-2910890-6955.
- [6] LAMIKIZ, A. a LAPEZ DE LACALLE, L.N. Cutting force estimation in sculptured surface milling. *International journal of machine tools*. 2004, **Vol. 44/14**, pp. 1511-15260890-6955.
- [7] SALGADO, M.. A., LACALLE, L. a Lamikiz, A.. Evaluation of the stiffness chain on the deflection of end-mills under cutting forces. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2005, **Vol. 45/6**, pp. 727-7390890-6955.
- [8] BOUZAKIS, K.D., AICHOUE, P. a EFSTATHIOU, K. Determination of the chip geometry, cutting force and roughness in free form surfaces finishing milling, with ball end tools. *International journal of machine tools*. 2003, **Vol. 43/5**, pp. 499-5140890-6955.
- [9] NING, Li. a VELDHUIS, Stephen. C. Mechanistic Modeling of Ball End Milling Including Tool Wear. *Journal of manufacturing processes*. 2006, **Vol. 8/1** 526-6125.
- [10] SHAW, Milton. C. *Metal cutting principles* 2nd. New York: Oxford University Press, 2005. 651 s. ISBN 01-951-4206-3.
- [11] VEPREK, S., MARITZA, J.G. a VEPREK-HEIJMAN, Industrial applications of superhard nanocomposite coatings. *Surface and Coatings technology*. 2008, **Vol. 202**, pp. 5063-5073.
- [12] JUNG, Y., KIM, J. a HWANG, S. Chip load prediction in ball-end milling. *Journal of materials processing technology*. 2001, **Vol. 111/1-3**, pp. 250-2550924-0136.

- [13] ASTAKHOV, V.P. *Metal Cutting Mechanics* 1st. CRC Press, 1999. ISBN 978-0849318955.
- [14] ELBESTAWI, M.A., SRIVASTAVA, A.K. a EL-WARDANY, T.I. A Model for Chip Formation During Machining of Hardened Steel. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*. 1996, **Vol. 45/1**, pp. 71-760007-8506.
- [15] HUMÁR, A. *Materiály pro řezné nástroje* MM publishing, 2008. 240 s. ISBN 978-80-254-2250-2.
- [16] PÍŠKA, M. a FOREJT, M. *Teorie obrábění tváření a nástroje* Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., 2006. 226 s. ISBN 80-214-2374-9.
- [17] ZOUHAR, J. *Vývoj výkonných frézovacích nástrojů s využitím CAD/CAM a analýzy mechanismu tvorby třísky* 2009. 104. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie.
- [18] FONTAINE, M., DEVILLEZ, A., MOUFKI, A. a DUDZINSKI, D.. Modelling of cutting forces in ball end milling with tool surface inclination Part I Predictive force model and experimental validation. *Journal of materials processing technology*. 2007, **Vol. 189/1-3**, pp. 73-840924-0136.
- [19] NELSON, S., SCHUELLER, J.K. a TLUSTY, J. Tool wear in milling hardened die steel. *Journal of Manufacturing Science engineers*. 1998, **Vol. 120**, pp. 669-673.
- [20] TOH, C.K. Surface topography analysis in high speed finish milling inclined hardened steel. *Precision Engineering*. 2004, **Vol. 28/4**, pp. 386-398.
- [21] FONTAINE, M., DEVILLEZ, A., MOUFKI, A. a DUDZINSKI, D.. Modelling of cutting forces in ball end milling with tool surface inclination Part II Influence of cutting condition, run-out, ploughing and inclination angle. *Journal of materials processing technology*. 2007, **Vol. 189/1-3**, pp. 85-960924-0136.
- [22] KORKUT, I. a DONERTAS, M.A. The influence of feed rate and cutting speed on the cutting forces, surface roughness and tool-chip contact length during face milling. *Materials and Design*. 2005, **Vol. 28**, pp. 308-312.
- [23] KOSHY, P., DEWES, R.C. a ASPINWALL, D.K. High speed end milling of hardened AISI D2 tool steel (58 HRC). *Journal of materials processing technology*. 2002, **Vol. 127/20924-0136**.
- [24] BOZ, Y., ERDIM, H. a LAZOGLU, I.. Modeling cutting forces for five axis milling of sculptured surfaces. *Advanced materials research*. 2011, **Vol. 223**, pp. 701-712.
- [25] PÍŠKA, M. a POLZER, A.. Cutting Performance of Ball Coated Cemented Carbide Cutters for Machining of Forming Tools 2004.

- [26] SADÍLEK, M. Strategie frézování naklopeným nástrojem 2006. [vid 28.4.2014]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/strategie-frezovani-naklopenym-nastrojem-realizace-experimentu.html>.
- [27] PÍŠKA, M. a kol., a. *Speciální technologie obrábění* Brno: CERM, s.r.o, 2009. ISBN 978-80-214-4025-8.
- [28] UTTENDORFSKÝ, A. *Studium řezivosti celokarbidových fréz s jemnou zrnitostí* Brno: 2010. 56. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství.
- [29] JOHNSON, G.R. a COOK, W.H. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures. *In 7th International Symposium on Ballistics*. 1983, , pp. 541-547.
- [30] BARÁNEK, I. *Rezné materiály pre rýchlostné, tvrdé a suché obrábanie* 2004. 67 s. ISBN 80-8075-013-0.
- [31] SCHULTZ, H. *High Speed Machining* Munchen Wien: Carl Hansen Verlag, 1996.
- [32] QUINTANA, G., CIURANA, J., FERRER, I. a RODRÍGUEZ, C.. I. Sound mapping for identification of stability lobe diagrams in milling processes. *Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2009, /49, pp. 203-211.
- [33] BACH, P. *Dynamické problémy obráběcích strojů* Praha, 2004. habilitační práce. ČVUT, Fakulta strojní.
- [34] FOJTŮ, P. Problematika samobuzeného kmitání při obrábění 2009, s. 14. Dostupné z: <http://stc.fs.cvut.cz/History/2009/Papers/pdf/FojtuPetr-304483.pdf>.
- [35] PÍŠKA, Miroslav. a POLZER, Aleš. Studie řezivosti hrubovacích fréz z produkce ZPS-FN, a.s., Zlín. 2003, , pp. 145-158.
- [36] Smith, Graham. *Cutting tool technology: Industrial handbook* Springer, 2008. ISBN 978-1-84800-204-3.
- [37] Čep, Robert. a Petrů, Jana. *Experimentální metody v obrábění* 2011. ISBN 978-80-248-2533-5. [1.3.2016]. Dostupné z: <http://homel.vsb.cz/cep77/PDF/>.
- [38] PÍŠKA, M. Testování PVD povlaků na rychlořezných vrtácích 2001, s. 58. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/testovani-pvd-povlaku-na-rychlomeznych-vrtacich.html>.
- [39] CIHLÁŘOVÁ, P. *Zvyšování řezivosti rychlořezných nástrojových ocelí na bázi PVD povlakování a použití moderních řezných kapalin: Disertační práce* 2007. 111. Brno: Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce: doc. Ing. Miroslav Píška, CSc.

- [40] [online]. *KISTLER* [vid. 25.4.2014]. Dostupné z: <http://www.kistler.com/>.
- [41] FIALA, Z., JAROŠ, A. a DVOŘÁČEK, J. An influence of tool wear on sound frequency of milling process *Sborník příspěvků Mezinárodní Masarykovy konference pro doktorandy a mladé vědecké pracovníky 2012* Hradec Králové: MAGNANIMITAS, 2012.
- [42] MONTGOMERY, Douglas. C.. Design and Analysis of Experiments. 2009, ISBN 978-0-470-39882.
- [43] *Plán experimentu*. online: [www2.humusoft.cz/www/akce/witkonf06/prispevky/ppt/maros.ppt](http://www2.humusoft.cz/www/akce/witkonf06/prispevky/ppt/maros.ppt).
- [44] BUDÍKOVÁ, M., KRÁLOVÁ, M. a MAROŠ, B. *Průvodce základními statistickými metodami* Grada Publishing, a.s, 2010. 272 s. ISBN 978-80-247-3243-5.
- [45] MANSON, Robert., GUNST, Richard. a HESS, James. *Statistical Design and Analysis of Experiments* WILEY-INTERSCIENCE, 2003. ISBN 0-471-37216-1.
- [46] ZAPLATÍLEK, Karel. a DONAR, Bohuslav. *Matlab tvorba uživatelských aplikací* BEN Technická literatura, 2004. 216 s. ISBN 978-80-7300-133-9.
- [47] ZAPLATÍLEK, Karel. a DONAR, Bohuslav. *Matlab začínáme se signály* BEN Technická literatura, 2006. 272 s. ISBN 80-7300-200-0.
- [48] SZABLEWSKI, D.. High Speed Face Milling of a Aluminium Silicon Alloy Casting. *CIRP Annals - Manufacturing technology*. 2004, **Vol. 53**, pp. 69-72.
- [49] BEZCE, C.E., CLAYTON, P., CHEN, L., EL-WARDANY, T.I. a ELBESTAWI, M.A. High-speed five-axis milling of hardened tool steel. *Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2000, **Vol. 40**, pp. 869-885.
- [50] WOJCIECHOWSKI, S. a TWARDOWSKI, P. Tool life and process dynamics in high speed ball end milling of hardened steel. *Annals of CIRP*. 2012, **Vol. 1**, pp. 289-294.
- [51] ASLAN, E. Experimental investigation of cutting tool performance in high speed cutting of hardened X210 Cr12 cold-work tool steel (62 HRC). *Materials in engineering*. 2005, **Vol. 26**/10261-3069.
- [52] ELBESTAWI, M.A., CHEN,, BEZCE, a EL-WARDANY, T.I.. High speed Milling of dies and molds in their hardened state. *Annals of CIRP*. 1997, **Vol. 46/1**, pp. 57-62.
- [53] DVOŘÁČEK, J. *Analýza silového zatížení frézovacího nástroje při pětiosém frézování* Brno, 2009. Diplomová práce. 92 s.
- [54] KAZUO, K. a YOSUKE, H.A.S. Prediction of chip formation and cutting forces in milling with ball-end mills and cutting. *Journal of the Japan society for precision engineering*. 2003, **Vol. 63**, pp. 396-401.

- [55] MAJERÍK, J. a ŠANDORA, J. *Nové progresívne nástroje a metody technológie obrábania* 1. vydanie. 2012. 213 s. ISBN 978-80-8075-515-7.
- [56] PIERSON, Hugh. O. *Handbook of chemical vapor deposition (CVD): principles, technology, and applications* 2nd. Norwich: Noyes Publications, 1999. 482 s. ISBN 08-155-1432-8.
- [57] STAHL, J.E. *Metal cutting theories and models* Elanders, 2012. 580 s. ISBN 978-91-637-1336-1.
- [58] VIVANCOS, J., LUIS, C.J., ORTIZ, J.A. a GONZÁLEZ, H.A. Analysis of factors affecting the high-speed side milling of hardened die steels. *Journal of materials processing technology*. 2005, , pp. 696-7010924-0136.
- [59] WEINERT, K., INASAKI, I., SUTHERLAND, J.W. a WAKABAYSHI, T. Dry machining and Minimum Quantity Lubrication. *Annals of CIRP*. 2004, **Vol. 53/2**, pp. 511-537.
- [60] YOSHIHIRO, K., HIROYUKI, F., YOSHIAKI, K., HEIZABRO, N. a TOSHIKI, H. Basic study of ball end milling on hardened steel. *Journal of materials processing technology*. 2001, **Vol. 111/1-3**, pp. 240-243.

## *LITERATURA*



# Publikace autora

1. DVOŘÁČEK, J.; POLZER, A.; ZOUHAR, J.; SEDLÁK, J.; PÍŠKA, M. On the Application of the PVD Hard Coatings for Ball Milling of Shaped Surfaces. *Internet Journal of Engineering and Technology*, 2010, roč. 1, č. 1, s. 11-18. ISSN: 1338- 2357.
2. DVOŘÁČEK, J.; MATUŠKA, M.; SEDLÁK, J. ON THE APPLICATION OF PVD HARD COATINGS FOR MILLING OF HARDENED STEEL. In *The International Conference NEWTECH 2011 on Advanced Manufacturing Engineering*. 1. Brno: LITERA BRNO, 2011. s. 93-98. ISBN: 978-80-214-4267- 2.
3. DVOŘÁČEK, J.; MATUŠKA, M.; BLAŽKOVÁ, V. Aplikace moderních PVD povlaků pro frézování kalených ocelí. In *Vysoce přesné technologie obrábění. Programování moderních CNC strojů*. 1. Brno: LITERA Brno, 2011. s. 5-12. ISBN: 978-80-214-4352- 5.
4. PÍŠKA, M.; DVOŘÁČEK, J.; SIZOVA, A.; SEDLÁK, J.; POLZER, A.; FOREJT, M. On the Cutting Performance of Nano-(Ti<sub>x</sub>Al<sub>1-x</sub>) N PVD Coatings. In *Materials Structure & Micromechanics of Fracture (MSMF-6). Key Engineering Materials (web)*. Pavel Šandera. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství: Repropress, Srbská 53, Brno, 2011. s. 395-398. ISBN: 978-80-214-4112- 5. ISSN: 1662- 9795.
5. PÍŠKA, M.; DVOŘÁČEK, J.; SIZOVA, A.; SEDLÁK, J.; POLZER, A.; FOREJT, M. On the Cutting Performance of Nano-(Ti,Al) N PVD Coatings. *Materials Structure & Micromechanics of Fracture (MSMF-6)*. Pavel Šandera. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství: Repropress, Srbská 53, Brno, 2010. s. 118-118. ISBN: 978-80-214-4112- 5.
6. HORÁČEK, M.; CHARVÁT, O.; PAVELKA, T.; SEDLÁK, J.; MADAJ, M.; NEJEDLÝ, J.; DVOŘÁČEK, J. Medical Implants by Using RP and Investment Casting Technologies. *China Foundry*, 2011, roč. 8, č. 1, s. 107-111. ISSN: 1672- 6421.
7. SEDLÁK, J.; PTÁČKOVÁ, M.; NEJEDLÝ, J.; MADAJ, M.; DVOŘÁČEK, J.; ZOUHAR, J.; CHARVÁT, O.; PÍŠKA, M. MATERIAL ANALYSIS OF TITANIUM ALLOY PRODUCED BY DIRECT METAL LASER SINTERING. *International Journal of Metalcasting*, 2013, roč. 7, č. 2, s. 43-50. ISSN: 1939- 5981.
8. SEDLÁK, J.; PÍŠKA, M.; PTÁČKOVÁ, M.; MADAJ, M.; CHARVÁT, O.; DVOŘÁČEK, J.; ZOUHAR, J. PROPERTIES OF THE BIOCOMPATIBLE TiAl6V4 MATERIAL PRODUCED BY DMLS. *International virtual journal for science, technics and innovations for the industry*, 2010, roč. 2010, č. 4- 5, s. 74-77. ISSN: 1313- 0226.

9. ZEMČÍK, O.; DVOŘÁČEK, J. A Distribution of Temperature Field in the FDM Printhead. In *The International Conference NEWTECH 2011 on Advanced Manufacturing Engineering*. 1. Brno: LITERA Brno, 2011. s. 115-119. ISBN: 978-80-214-4267- 2.
10. JAROŠ, A.; FIALA, Z.; DVOŘÁČEK, J. INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF AlTiCrN COATING FOR DRY MILLING OF CONSTRUCTION STEEL 1. 8159. In *Sborník příspěvků Mezinárodní Masarykovy konference pro doktorandy a mladé vědecké pracovníky 2012*. 1. Hradec Králové: MAGNANIMITAS, 2012. s. 3475-3482. ISBN: 978-80-905243-3- 0.
11. FIALA, Z.; JAROŠ, A.; DVOŘÁČEK, J. Influence of a tool wear on sound frequency of milling process. In *Mezinárodní Masarykova konference pro doktorandy a vědecké pracovníky*. 1. Hradec Králové: Magnanimitas, 2012. s. 3483-3489. ISBN: 978-80-905243-3- 0.
12. ZEMČÍK, O.; DVOŘÁČEK, J. Rozložení teplotního pole v FDM tiskové hlavě. In *Vysoce přesné technologie obrábění. Programování moderních CNC strojů*. 1. Brno: LITERA Brno, 2011. s. 21-28. ISBN: 978-80-214-4352- 5.
13. SEDLÁK, J.; DVOŘÁČEK, J.; RUSIŇÁK, M. Hodnocení průběhu silového zatížení při vystružování hlavicí MT3. In *Vysoce přesné technologie obrábění. Programování moderních CNC strojů*. 1. Brno: LITERA Brno, 2011. s. 29-42. ISBN: 978-80-214-4352- 5.
14. SEDLÁK, J.; DVOŘÁČEK, J.; JOSIEK, R. ANALYSIS OF DEVIATION OF THE PITCH STABILITY IN PRODUCTION OF HYDRAULIC HOSES. In *Sborník příspěvků Mezinárodní Masarykovy konference pro doktorandy a mladé vědecké pracovníky 2012*. 1. Hradec Králové: MAGNANIMITAS, 2012. s. 15-24. ISBN: 978-80-905243-3- 0.
15. MADAJ, M.; KODYS, M.; BLAŽKOVÁ, V.; DVOŘÁČEK, J.; PÍŠKA, M.; SEDLÁK, J.; CHARVÁT, O. Skořepinové náhrady kloubů. In *FSI Junior konference 2011*. 1. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2011. s. 1-6. ISBN: 978-80-214-4359-4.

# Seznam použitých zkratek

Použitá zkratka	Význam
CAM	Computer aided manufacturing
CNC	Computer numeric control
CVD	chemical vapour deposition
HFC	high feed cutting
HPC	high productive cutting
HSC	high speed machining
HSS	high speed steel (rychlořezná ocel)
KNB	kubický nitrid boru
MTCVD	midle temperature chemical vapour deposition
NC	Numeric control
OC	obráběcí centrum
PACVD	plasma assisted chemical vapour deposition
PKD	polykrystalický diamant
PLD	laser assisted deposition
PVD	physical vapour deposition
SK	slinutý karbid
VBD	vyměnitelná břitová destička
FFT	Fast Fourier Transform

## *SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ*

# Seznam použitých symbolů

symbol	jednotka	význam
$v_c$	$[m \cdot \min^{-1}]$	řezná rychlost
$v_f$	$[mm \cdot \min^{-1}]$	posuvová rychlost
$v_e$	$[m \cdot \min^{-1}]$	výsledná rychlost řezného pohybu
$n_z$	$[-]$	počet zubů v záběru
$B$	$[mm]$	šířka obráběné plochy
$D$	$[mm]$	průměr řezného nástroje
$z$	$[-]$	celkový počet zubů řezného nástroje
$F$	$[N]$	celková zatěžující síla
$F_c$	$[N]$	řezná síla
$F_{cN}$	$[N]$	normálová řezná síla
$F_p$	$[N]$	pasivní síla
$A_D$	$[mm^2]$	průřez třísky
$k_c$	$[MPa]$	měrná řezná síla
$A_{Dmax}$	$[mm^2]$	maximální průřez tří
$h_{max}$	$[mm]$	tloušťka třísky
$a_p$	$[mm]$	šířka záběru hlavního ostří
$k_{FCN}$	$[MPa]$	měrná normálová řezná síla
$k_{FP}$	$[MPa]$	měrná pasivní řezná síla
$x_D$	$[mm]$	efektivní průměr
$f_z$	$[mm]$	posuv na zub
$n$	$[\min^{-1}]$	otáčky
$A$	$[-]$	materiálová konstanta
$B$	$[-]$	materiálová konstanta
$C$	$[-]$	materiálová konstanta
$m$	$[-]$	materiálová konstanta
$n$	$[-]$	materiálová konstanta
$F_{sh}$	$[N]$	tangenciální síla v rovinně stříhu
$F_{shN}$	$[N]$	normálová síla v rovinně stříhu
$F_\gamma$	$[N]$	tangenciální síla působící na čele nástroje
$F_{\gamma N}$	$[N]$	normálová síla působící na čele nástroje

## SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

symbol	jednotka	význam
$v_{ch}$	$[m \cdot min^{-1}]$	rychlost pohybu třísky
$v_{sh}$	$[m \cdot min^{-1}]$	rychlost pohybu v rovině stříhu
$h_{dc}$	$[mm]$	tloušťka třísky
$F_f$	$[N]$	posuvová síla
$F_m$	$[N]$	D'alambertova dynamická nestacionární síla
$h_D$	$[mm]$	jmenovitá tloušťka třísky
$A_{sh}$	$[mm^2]$	plocha roviny maximálních smykových napětí
$b_D$	$[mm]$	jmenovitá šířka třísky
$F_{xM}$	$[N]$	složka silového zatížení v souřadném systému stroje v ose x
$F_{yM}$	$[N]$	složka silového zatížení v souřadném systému stroje v ose y
$F_{zM}$	$[N]$	složka silového zatížení v souřadném systému stroje v ose z
$a_e$	$[mm]$	radiální šířka záběru hlavního ostří
$F_M$	$[N]$	výslednice složek silového zatížení v souřadném systému stroje
$F_a$	$[N]$	aktivní složka silového zatížení
x, y, z	$[-]$	osy souřadného systému stroje
$M_x$	$[N \cdot m]$	Velikost momentu v ose x
$M_y$	$[N \cdot m]$	Velikost momentu v ose y
$M_z$	$[N \cdot m]$	Velikost momentu v ose z
$F_x$	$[N]$	složka silového zatížení v ose x
$F_y$	$[N]$	složka silového zatížení v ose y
$F_z$	$[N]$	složka silového zatížení v ose z
$T$	$[^{\circ}C]$	teplota materiálu
$T_{melt}$	$[^{\circ}C]$	teplota tavení
$T_{room}$	$[^{\circ}C]$	teplota tavení materiálu

Řecký symbol	Jednotka	Význam
$\dot{\bar{\varepsilon}}^p$	$[s^{-1}]$	rychlost redukováného přetvoření
$\dot{\bar{\varepsilon}}^0$	$[-]$	počáteční bezrozměrná rychlost přetvoření
$\bar{\varepsilon}^p$	$[-]$	redukované plastické přetvoření
$\beta_n$	$[^\circ]$	úhel naklopení nástroje/obrobku
$\varphi$	$[^\circ]$	úhel záběru
$\gamma_o$	$[^\circ]$	úhel čela v rovině ortogonální
$\Phi$	$[^\circ]$	úhel sklonu střižné roviny
$\alpha_o$	$[^\circ]$	úhel hřbetu v rovině ortogonální
$\beta_o$	$[^\circ]$	úhel břitu v rovině ortogonální
$\sigma$	[MPa]	skutečné napětí
$\varphi_{\max}$	$[^\circ]$	maximální úhel záběru
$\tau_{sh}$	[MPa]	smykové napětí ve střižné rovině
$\lambda_s$	$[^\circ]$	úhel sklonu hlavního ostří
$\lambda_t$	$[^\circ]$	třecí úhel





# Seznam příloh

**PŘÍLOHA I - DEATILNÍ ANALÝZA TAVBY MATERIÁLU  
EN-AB- $\text{AlSi9Cu3(Fe)}$**

**PŘÍLOHA II - VÝCHOZÍ GEOMETRIE FRÉZOVACÍ  
HLAVY**

- II-1 Výchozí geometrie frézovací hlavy - výkres sestavy frézovací hlavy a VBD
- II-2 Výchozí geometrie frézovací hlavy - výkres frézovací hlavy (I)
- II-3 Výchozí geometrie frézovací hlavy - výkres frézovací hlavy (II)
- II-4 Kompletní snímková dokumentace - před/po, SM i TEM
- II-5 Analýza řezivosti VBD (prvotní měření) - tab.1, 2, 3, 4
- II-6 Kompletní snímková dokumentace - před/po, SM i TEM
- II-7 Analýza řezivosti VBD (doměřené hodnoty) - tab.5, 6, 7, 8

**PŘÍLOHA III - ZMĚNĚNÁ GEOMETRIE FRÉZOVACÍ HLAVY**

- III-1 Změněná geometrie frézovací hlavy - výkres sestavy frézovací hlavy a VBD
- III-4 Kompletní snímková dokumentace - před/po, SM i TEM
- III-5 Analýza řezivosti VBD (změněná geometrie) - tab.1, 2, 3, 4



# **PŘÍLOHA I**

**Detailní analýza tavby materiálu  
EN-AB-ALSi9Cu3(Fe)**





ANALÝZA / ANALYSE  
DODAVATEL / LIEFERANT / SUPPLIER  
REMET, spol. s.r.o.  
Videňská 11/127, 619 00 Brno, Czech Republic  
ODBĚRATEL / ABNEHMER / CUSTOMER



Czech

DIN EN 10204-3.1.

Dodací list č. / Lieferschein Objednávka č. / Verkaufbestätigung Značení / Markierung Termín dodání / Liefertag	oranžová 01.12.2011	Materiál Hmotnost / Gewicht Přeprava / Spedition	226 D 120 Kg EXW					
Program: Al-20, Al/Si - slitiny Průměr: (n=2) Podniková norma: 060	Provedení: MASSEL Norma jakosti: DIN 226 D Vzorek-charge c.: 11595	Datum: 01.12.2011 14:42:05 Barevně označen: oranžová						
Si 11 8.57 % 8	Fe 1.1 0.826 % 0.75	Cu 4 2.38 % 2	Mn 0.55 0.261 % 0.15	Mg 0.55 0.391 % 0.15	Zn 1.2 1.18 % 0.15	Pb 0.35 0.0838 % 0.15	Sb 0.0041 % 0.0041 %	Sn 0.25 0.0409 % 0.0409 %
Cr 0.15 0.0494 %	P 0.00083 % 0.00083 %	Ca 0.0025 0.0015 %	Sr 0.00003 % 0.00003 %	Ni 0.55 0.0615 %	Ti 0.2 0.0448 %	Bi 0.007 % 0.007 %	Co 0.0013 % 0.0013 %	Na 0.00022 % 0.00022 %
V 0.0068 %	Zr 0.007 % 0.007 %	Cd 0.01 0.00046 %	Be 0.00003 % 0.00003 %	Li 0.00001 % 0.00001 %	Al 86.1 % 86.1 %	Di 2.77 2.77	Mfaktor 1.5 1.5	
Celková hm. tavby / Chargegewicht / Meltage weight								120.00 Kg
Počet svazků / Bündezahl / Number of packs								1

MATERIÁL NENÍ RADIOAKTIVNÍ < 100 Bq / Kg

Počet svazků celkem / Bündezahl Insgesamt / Number of packs together

1

Datum / Date	Odpovědný pracovník / Verantwortlicher Mitarbeiter / Person responsible	Podpis / Unterschrift / Signature
01.12.2011	OŠMERA TOMÁŠ	



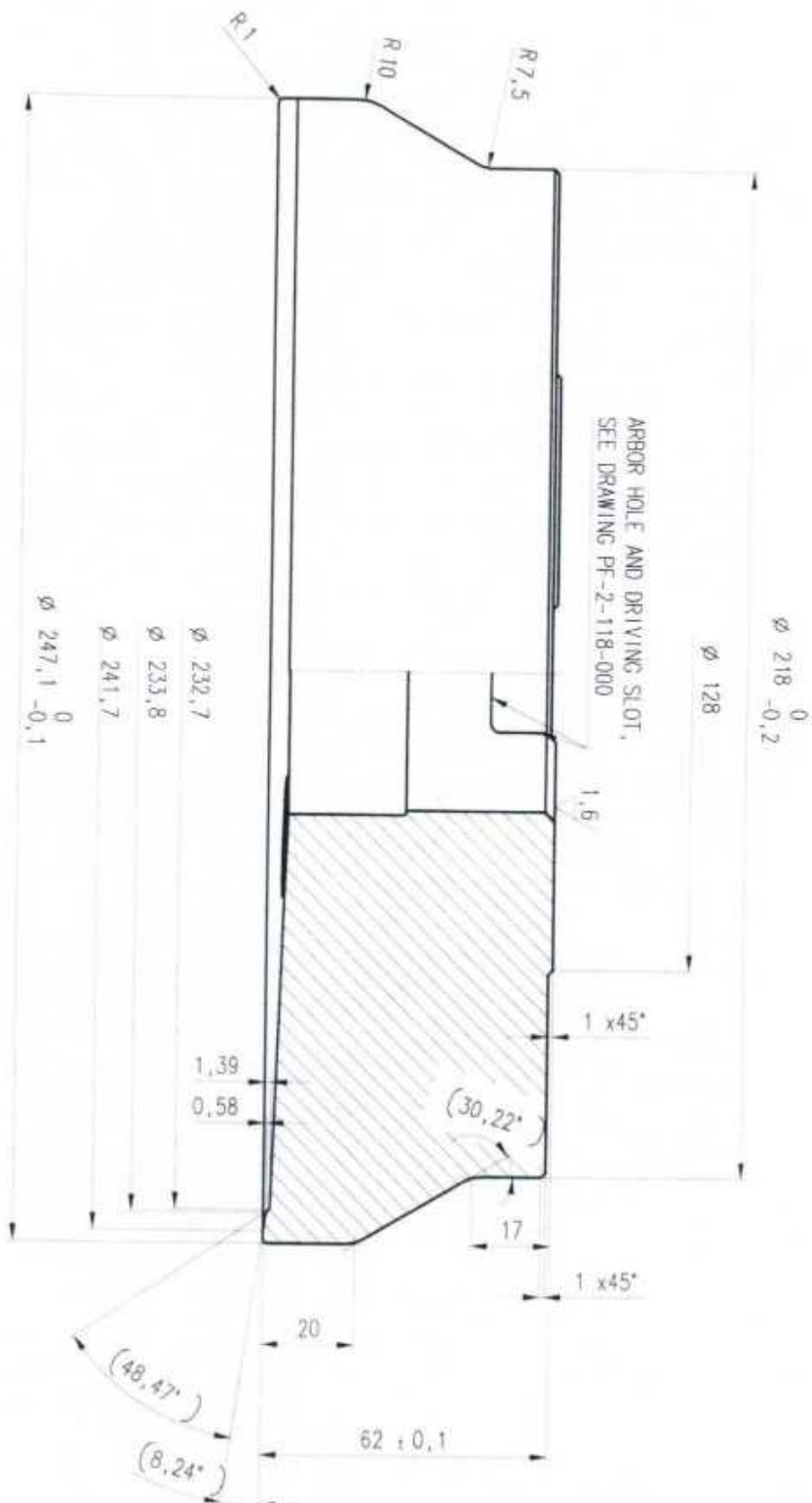
# **PŘÍLOHA II**

## **Výchozí geometrie frézovací hlavy**





[illegible]

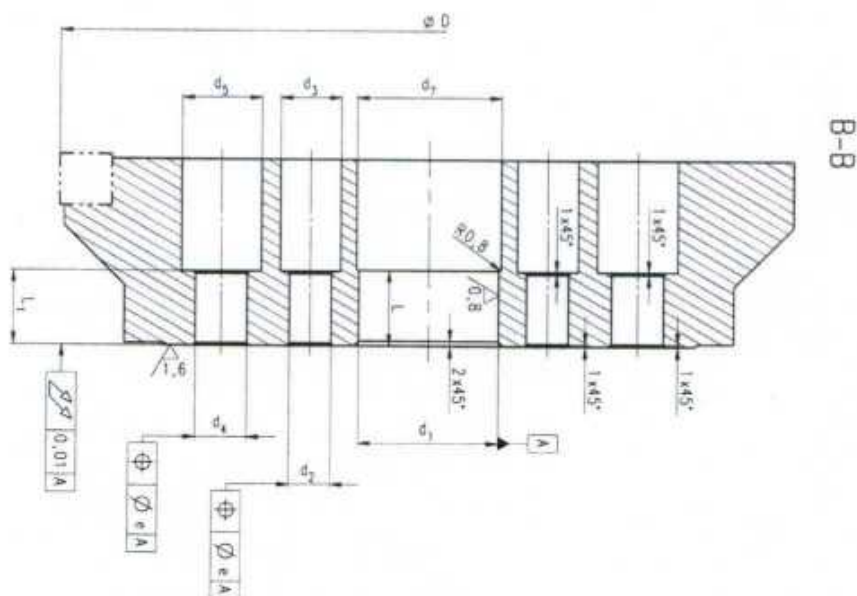
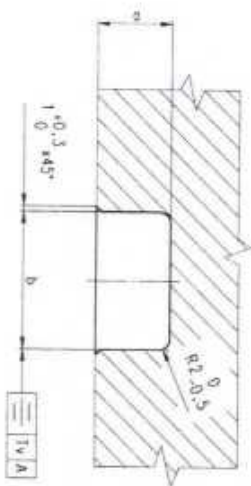
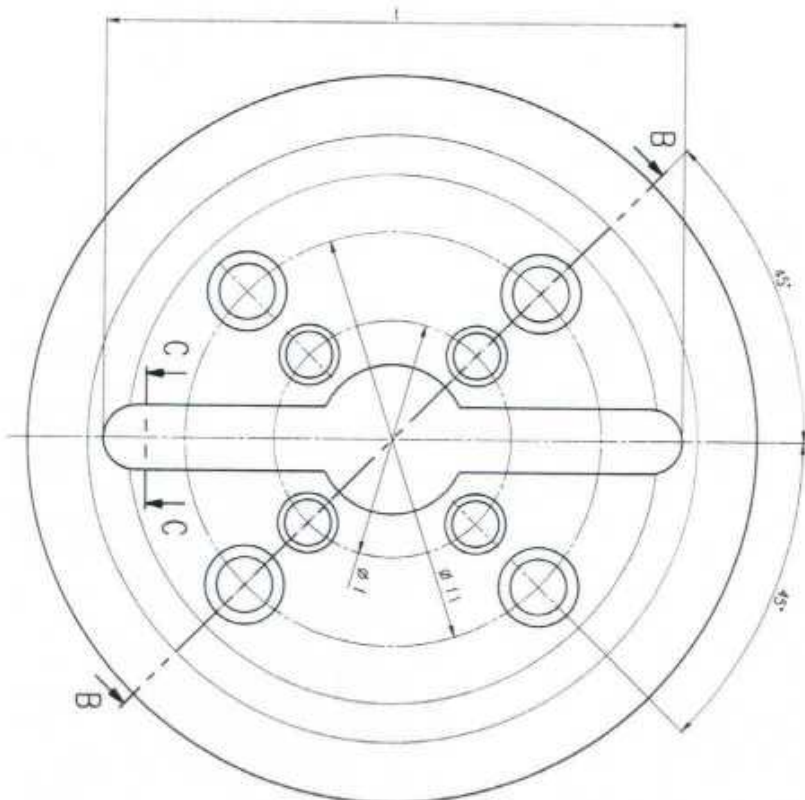



3.2/1.6

Part	Quantity	Unit	Material	Notes
VLCX J.	16	343.7	250C02R-S90AD16E pr 1	SHOULDER MILLING CUTTER
01.09.11			250C02R-S90AD16E	BLANK
PRAMET				

PRAMET TOOLS, S.R.L.

System of projection: 

[illegible]
$$3.2 \Delta(0.8/1.5)$$

Part	Order #	Alt #	Rev #	Date
Kerrall B E. 11-0000 Kerrall B	Mk III (not a type C) (if) 1000			
Part #				
N	ARBOR HOLE TYPE C MILLING CUTTERS			
 PF-2-118-000				

Výchozí geometrie

Snímková dokumentace SM			Snímková dokumentace TEM	
	Nová	Po řezných zkouškách	Nová	Po řezných zkouškách
Bez povlaku				
Alu-Speed				4 
Darwin				
Tripple-Alwin	4 			

**Tab.1 Analýza řezivosti VBD s povlakem AluSpeed – výchozí geometrie – prvotní měření**

	F <sub>c</sub> [N]					F <sub>cn</sub> [N]					F <sub>p</sub> [N]				
<i>T</i>	<i>MED.</i>	<i>Q1</i>	<i>Q3</i>	<i>MAX</i>	<i>MIN</i>	<i>MED.</i>	<i>Q1</i>	<i>Q3</i>	<i>MAX</i>	<i>MIN</i>	<i>MED.</i>	<i>Q1</i>	<i>Q3</i>	<i>MAX</i>	<i>MIN</i>
1,0	197,39	193,51	201,06	211,46	178,06	5,55	-0,31	11,25	23,76	-7,85	26,3449	28,27	24,20	19,26	
8,5	238,82	233,74	242,99	255,43	207,76	34,60	28,78	41,79	57,41	13,73	13,7624	16,00	11,80	-4,45	
16,5	225,06	217,55	231,42	251,75	191,45	43,46	38,48	48,97	65,28	25,82	1,67598	-4,10	0,52	7,51	
24,5	234,07	221,05	243,96	270,80	192,83	53,62	48,30	60,34	82,96	36,07	1,08555	-2,21	4,76	12,71	

	F [N]	K <sub>c</sub> [MPa]					P <sub>c</sub> [kW]				
<i>T</i>	<i>MED.</i>	<i>MED.</i>	<i>Q1</i>	<i>Q3</i>	<i>MAX</i>	<i>MIN</i>	<i>MED.</i>	<i>Q1</i>	<i>Q3</i>	<i>MAX</i>	<i>MIN</i>
1,0	199,32	552,91	542,03	563,18	592,32	498,76	3,61	3,54	3,68	3,87	3,26
8,5	242,54	668,96	654,73	680,64	715,48	581,96	4,37	4,28	4,45	4,68	3,80
16,5	229,68	630,42	609,38	648,23	705,17	536,26	4,12	3,98	4,24	4,61	3,50
24,5	242,07	655,65	619,18	683,36	758,54	540,14	4,29	4,05	4,47	4,96	3,53

**Tab.2 Analýza řezivosti VBD bez povlaku – výchozí geometrie – prvotní měření**

	F <sub>c</sub> [N]					F <sub>cn</sub> [N]					F <sub>p</sub> [N]				
<i>T</i>	<i>MED.</i>	<i>Q1</i>	<i>Q3</i>	<i>MAX</i>	<i>MIN</i>	<i>MED.</i>	<i>Q1</i>	<i>Q3</i>	<i>MAX</i>	<i>MIN</i>	<i>MED.</i>	<i>Q1</i>	<i>Q3</i>	<i>MAX</i>	<i>MIN</i>
1,0	193,91	189,71	197,43	207,33	180,66	15,00	8,08	22,02	38,44	-11,10	-26,78	-28,71	-24,86	-18,13	-32,69
8,5	214,07	209,68	220,65	232,69	201,83	42,60	37,69	46,75	60,07	25,94	-9,85	-11,40	-7,83	-3,15	-16,43
16,5	231,94	227,98	238,03	255,31	218,42	42,21	36,58	48,06	63,13	20,75	-2,64	-4,85	-0,37	5,84	-10,56
24,5	239,35	234,07	246,15	261,82	219,27	50,71	45,41	55,44	74,49	33,69	3,95	1,68	6,42	16,79	-5,78

	F [N]	K <sub>c</sub> [MPa]					P <sub>c</sub> [kW]				
<i>T</i>	<i>MED.</i>	<i>MED.</i>	<i>Q1</i>	<i>Q3</i>	<i>MAX</i>	<i>MIN</i>	<i>MED.</i>	<i>Q1</i>	<i>Q3</i>	<i>MAX</i>	<i>MIN</i>
1,0	196,42	543,16	531,40	553,03	580,76	506,05	3,55	3,48	3,62	3,80	3,31
8,5	219,17	599,64	587,34	618,06	651,79	565,35	3,92	3,84	4,05	4,27	3,70
16,5	236,14	649,69	638,60	666,75	715,15	611,81	4,25	4,18	4,36	4,68	4,00
24,5	245,13	670,43	655,67	689,49	733,38	614,21	4,39	4,29	4,51	4,80	4,02

**Tab.3 Analýza řezivosti VBD s povlakem Darwin – výchozí geometrie – prvotní měření**

	F <sub>c</sub> [N]					F <sub>cn</sub> [N]					F <sub>p</sub> [N]				
<i>T</i>	<i>MED.</i>	<i>Q1</i>	<i>Q3</i>	<i>MAX</i>	<i>MIN</i>	<i>MED.</i>	<i>Q1</i>	<i>Q3</i>	<i>MAX</i>	<i>MIN</i>	<i>MED.</i>	<i>Q1</i>	<i>Q3</i>	<i>MAX</i>	<i>MIN</i>
1,0	131,70	124,56	136,86	150,50	108,69	5,55	-0,31	11,26	23,76	-17,85	-26,34	-28,27	-24,20	-19,26	-33,64
8,5	221,37	217,62	225,78	237,92	207,83	34,60	28,78	41,79	57,41	13,73	-13,76	-16,00	-11,80	-4,45	-22,00
16,5	245,52	241,75	251,44	264,57	229,07	43,30	38,38	48,58	65,28	25,81	-1,73	-4,13	0,55	7,51	-12,22
24,5	245,41	240,51	250,87	266,76	225,72	53,32	48,23	59,54	82,96	36,07	0,88	-2,31	4,76	12,71	-11,67

	F [N]	K <sub>c</sub> [MPa]					P <sub>c</sub> [kW]				
<i>T</i>	<i>MED.</i>	<i>MED.</i>	<i>Q1</i>	<i>Q3</i>	<i>MAX</i>	<i>MIN</i>	<i>MED.</i>	<i>Q1</i>	<i>Q3</i>	<i>MAX</i>	<i>MIN</i>
1,0	133,55	368,90	348,91	383,37	421,57	304,45	2,41	2,28	2,51	2,76	1,99
8,5	225,14	620,09	609,58	632,44	666,44	582,17	4,06	3,99	4,14	4,36	3,81
16,5	250,65	687,73	677,18	704,32	741,09	641,66	4,50	4,43	4,61	4,85	4,20
24,5	251,44	687,42	673,71	702,73	747,22	632,27	4,50	4,41	4,60	4,89	4,14

**Tab. 4 Analýza řezivosti VBD s povlakem TripleAlwin – výchozí geometrie – prvotní měření**

	F <sub>c</sub> [N]					F <sub>cn</sub> [N]					F <sub>p</sub> [N]				
<i>T</i>	<i>MED.</i>	<i>Q1</i>	<i>Q3</i>	<i>MAX</i>	<i>MIN</i>	<i>MED.</i>	<i>Q1</i>	<i>Q3</i>	<i>MAX</i>	<i>MIN</i>	<i>MED.</i>	<i>Q1</i>	<i>Q3</i>	<i>MAX</i>	<i>MIN</i>
1,0	202,22	190,69	208,61	218,92	166,14	19,83	13,36	26,57	39,56	-8,32	-22,20	-24,41	-20,10	-14,87	-30,97
8,5	199,26	186,35	211,18	228,11	157,92	46,41	42,23	51,49	67,04	29,82	-4,90	-7,46	-2,24	7,80	-14,85
16,5	206,91	192,95	221,67	240,85	169,04	52,16	47,25	57,65	75,04	36,57	3,88	0,58	7,19	16,03	-5,77
24,5	218,50	205,95	234,32	267,63	181,98	80,28	74,68	87,60	128,95	56,52	9,71	6,18	13,97	25,93	-0,79

	F [N]	K <sub>c</sub> [MPa]					P <sub>c</sub> [kW]				
<i>T</i>	<i>MED.</i>	<i>MED.</i>	<i>Q1</i>	<i>Q3</i>	<i>MAX</i>	<i>MIN</i>	<i>MED.</i>	<i>Q1</i>	<i>Q3</i>	<i>MAX</i>	<i>MIN</i>
1,0	204,83	566,44	534,15	584,35	613,23	465,39	3,71	3,50	3,82	4,01	3,05
8,5	204,74	558,16	521,99	591,53	638,96	442,36	3,65	3,42	3,87	4,18	2,90
16,5	214,24	579,58	540,49	620,94	674,65	473,50	3,79	3,54	4,06	4,42	3,10
24,5	234,25	612,05	576,89	656,36	749,65	509,74	4,01	3,78	4,30	4,91	3,34

**Tab. 5 Analýza řezivosti VBD s povlakem AluSpeed – výchozí geometrie – doměřené hodnoty**

<i>T</i>	<b>F<sub>c</sub> [N]</b>					<b>F<sub>cn</sub> [N]</b>					<b>F<sub>p</sub> [N]</b>				
	<i>MED.</i>	<i>Q1</i>	<i>Q3</i>	<i>MAX</i>	<i>MIN</i>	<i>MED.</i>	<i>Q1</i>	<i>Q3</i>	<i>MAX</i>	<i>MIN</i>	<i>MED.</i>	<i>Q1</i>	<i>Q3</i>	<i>MAX</i>	<i>MIN</i>
1,00	180,98	170,14	184,49	194,20	139,59	30,51	23,51	44,50	63,44	6,03	-3,87	-5,76	-1,80	6,98	-10,55
2,00	192,21	179,04	195,58	209,20	156,57	50,27	41,78	58,59	76,71	28,12	3,86	1,55	6,64	14,83	-3,61
3,00	202,11	187,74	206,22	216,06	159,99	52,36	47,13	59,18	75,47	34,65	7,91	5,77	10,33	18,81	-1,51
4,00	201,15	194,93	206,11	223,16	166,86	57,36	51,57	63,18	78,51	36,36	17,41	14,45	20,46	30,98	4,88
5,00	211,20	204,93	216,21	233,16	176,86	62,33	56,53	68,18	83,51	41,36	25,41	22,45	28,46	38,98	12,88
6,00	200,75	196,03	204,92	219,82	181,79	46,03	40,53	53,02	73,36	24,06	14,37	11,24	18,15	28,05	3,41
7,00	216,87	213,93	219,89	235,72	204,04	50,29	43,00	58,16	78,59	26,23	24,35	20,99	27,32	38,47	9,65
8,00	207,84	205,39	210,40	225,00	198,37	48,58	41,20	56,97	81,73	28,40	15,05	12,05	17,96	24,94	4,66
9,00	222,94	219,93	226,10	236,72	207,53	61,08	53,53	68,18	83,47	35,00	21,61	18,96	24,52	32,94	8,53
10,00	221,88	215,76	226,63	239,33	193,47	59,77	53,98	65,70	80,09	41,32	25,34	22,27	28,20	43,84	14,33
11,00	209,29	201,52	212,97	228,09	177,77	55,16	49,20	63,65	83,89	35,26	11,68	9,03	13,96	21,73	3,45
12,00	213,01	203,21	217,36	231,34	184,61	65,56	58,32	74,39	94,59	43,04	19,95	17,17	22,65	30,96	10,01
13,00	209,54	191,97	223,72	242,46	171,19	64,41	58,70	70,60	85,13	40,42	15,19	11,24	23,54	37,71	3,49
14,00	212,06	199,01	216,14	228,04	174,49	62,99	56,89	71,79	96,29	42,56	16,64	13,82	19,14	25,99	5,04

<i>T</i>	<b>K<sub>c</sub> [MPa]</b>					<b>P<sub>c</sub> [kW]</b>				
	<i>MED.</i>	<i>Q1</i>	<i>Q3</i>	<i>MAX</i>	<i>MIN</i>	<i>MED.</i>	<i>Q1</i>	<i>Q3</i>	<i>MAX</i>	<i>MIN</i>
1,00	506,96	476,59	516,78	543,99	391,00	3,32	3,12	3,38	3,56	2,56
2,00	538,40	501,53	547,85	585,99	438,58	3,52	3,28	3,59	3,84	2,87
3,00	566,14	525,88	577,64	605,22	448,15	3,71	3,44	3,78	3,96	2,93
4,00	563,43	546,01	577,33	625,10	467,39	3,69	3,57	3,78	4,09	3,06
5,00	591,59	574,02	605,62	653,11	495,41	3,87	3,76	3,96	4,27	3,24
6,00	562,31	549,10	574,01	615,74	509,22	3,68	3,59	3,76	4,03	3,33
7,00	607,49	599,24	615,93	660,27	571,54	3,98	3,92	4,03	4,32	3,74
8,00	582,18	575,33	589,35	630,24	555,67	3,81	3,77	3,86	4,12	3,64
9,00	624,48	616,05	633,33	663,08	581,33	4,09	4,03	4,15	4,34	3,80
10,00	621,52	604,37	634,81	670,38	541,92	4,07	3,96	4,15	4,39	3,55
11,00	586,24	564,49	596,56	638,90	497,94	3,84	3,69	3,90	4,18	3,26
12,00	596,67	569,22	608,85	648,00	517,12	3,91	3,73	3,98	4,24	3,38
13,00	586,95	537,73	626,67	679,16	479,51	3,84	3,52	4,10	4,45	3,14
	593,99	557,44	605,43	638,77	488,77	3,89	3,65	3,96	4,18	3,20

**Tab. 6 Analýza řezivosti VBD bez povlaku – výchozí geometrie – doměřené hodnoty**

<i>T</i>	<b>F<sub>c</sub> [N]</b>					<b>F<sub>cn</sub> [N]</b>					<b>F<sub>p</sub> [N]</b>				
	<i>MED.</i>	<i>Q1</i>	<i>Q3</i>	<i>MAX</i>	<i>MIN</i>	<i>MED.</i>	<i>Q1</i>	<i>Q3</i>	<i>MAX</i>	<i>MIN</i>	<i>MED.</i>	<i>Q1</i>	<i>Q3</i>	<i>MAX</i>	<i>MIN</i>
1,00	183,69	180,56	186,17	194,77	163,63	26,68	21,34	31,39	43,70	7,93	-31,30	-32,72	-29,95	-23,47	-36,44
2,00	182,10	177,94	185,46	198,78	154,56	28,39	20,52	39,71	61,17	6,84	-23,61	-25,35	-22,00	-16,20	-29,84
3,00	181,23	177,04	185,61	194,99	154,51	34,55	29,08	40,86	58,10	17,79	-20,17	-21,82	-18,57	-8,28	-25,87
4,00	185,66	180,10	189,00	198,70	157,67	39,01	32,86	46,19	68,63	19,66	-19,25	-21,05	-16,81	-10,49	-26,22
5,00	205,29	198,01	210,67	224,64	167,06	40,96	35,66	46,12	60,22	23,65	-16,30	-18,00	-14,36	-6,52	-23,28
6,00	194,16	185,86	198,90	213,22	156,82	41,86	37,02	48,15	68,05	25,03	-16,59	-18,63	-14,79	-6,85	-23,15
7,00	196,59	186,17	203,42	222,89	153,94	47,26	40,79	59,63	81,79	26,41	-11,82	-14,20	-9,85	4,65	-18,61
8,00	202,38	190,15	213,88	234,24	151,49	58,81	51,71	65,94	84,56	39,77	-7,49	-10,11	-4,30	3,69	-15,34
9,00	202,38	190,15	213,48	234,24	151,49	58,85	51,76	66,08	84,56	39,77	-7,49	-10,15	-4,30	3,69	-15,34
10,00	199,13	188,14	207,25	233,51	150,82	57,73	52,71	63,66	81,06	38,67	-7,95	-10,31	-5,40	4,41	-15,65
11,00	205,56	197,07	210,67	228,32	159,02	56,43	49,95	63,92	78,02	37,78	-5,81	-8,48	-3,42	5,56	-13,84
12,00	201,31	193,14	206,58	229,71	162,86	55,59	50,47	63,56	78,21	37,21	-7,42	-9,49	-5,36	4,09	-13,64
13,00	212,06	199,01	216,09	228,56	174,49	62,52	56,63	70,71	96,29	42,56	16,76	13,82	19,21	25,99	5,04
14,00	220,60	220,60	220,60	220,60	220,60	85,00	85,00	85,00	85,00	85,00	25,25	25,25	25,25	25,25	25,25

<i>T</i>	<b>K<sub>c</sub> [MPa]</b>					<b>P<sub>c</sub> [kW]</b>				
	<i>MED.</i>	<i>Q1</i>	<i>Q3</i>	<i>MAX</i>	<i>MIN</i>	<i>MED.</i>	<i>Q1</i>	<i>Q3</i>	<i>MAX</i>	<i>MIN</i>
1,00	514,54	505,76	521,49	545,58	458,36	3,37	3,31	3,41	3,57	3,00
2,00	510,09	498,44	519,50	556,80	432,95	3,34	3,26	3,40	3,64	2,83
3,00	507,66	495,90	519,90	546,19	432,80	3,32	3,25	3,40	3,57	2,83
4,00	520,07	504,50	529,41	556,58	441,66	3,40	3,30	3,46	3,64	2,89
5,00	575,04	554,64	590,10	629,25	467,95	3,76	3,63	3,86	4,12	3,06
6,00	543,85	520,61	557,15	597,25	439,28	3,56	3,41	3,65	3,91	2,88
7,00	550,66	521,48	569,80	624,35	431,21	3,60	3,41	3,73	4,09	2,82
8,00	566,88	532,62	599,11	656,13	424,35	3,71	3,49	3,92	4,29	2,78
9,00	566,88	532,62	597,98	656,13	424,35	3,71	3,49	3,91	4,29	2,78
10,00	557,80	527,01	580,54	654,09	422,46	3,65	3,45	3,80	4,28	2,76
11,00	575,81	552,00	590,12	639,54	445,43	3,77	3,61	3,86	4,19	2,92
12,00	563,88	541,00	578,67	643,44	456,18	3,69	3,54	3,79	4,21	2,99
13,00	593,99	557,44	605,28	640,22	488,77	3,89	3,65	3,96	4,19	3,20
14,00	617,93	617,93	617,93	617,93	617,93	4,04	4,04	4,04	4,04	4,04



**Tab. 7 Analýza řezivosti VBD s povlakem Darwin – výchozí geometrie – doměřené hodnoty**

	<b>F<sub>C</sub> [N]</b>					<b>F<sub>CN</sub> [N]</b>					<b>F<sub>P</sub> [N]</b>				
<i>T</i>	<i>MED.</i>	<i>Q1</i>	<i>Q3</i>	<i>MAX</i>	<i>MIN</i>	<i>MED.</i>	<i>Q1</i>	<i>Q3</i>	<i>MAX</i>	<i>MIN</i>	<i>MED.</i>	<i>Q1</i>	<i>Q3</i>	<i>MAX</i>	<i>MIN</i>
1,00	177,25	173,94	179,78	186,80	157,08	19,30	12,55	25,83	42,44	-3,94	-20,36	-22,44	-18,20	-12,63	-27,78
2,00	172,44	169,13	176,31	194,21	158,48	23,57	19,58	28,35	41,82	8,35	-14,77	-16,95	-12,72	-6,60	-21,68
3,00	201,67	193,87	206,02	217,36	174,40	43,59	34,87	50,50	65,88	19,60	-4,78	-6,60	-2,72	4,63	-11,85
4,00	201,10	189,24	205,19	215,40	158,20	46,45	39,56	55,17	69,32	25,42	-1,63	-3,38	0,71	10,36	-7,90
5,00	207,32	191,90	214,19	230,63	154,18	52,33	39,13	64,54	84,28	25,03	-2,96	-5,08	-0,70	6,97	-12,81
6,00	214,77	197,48	223,03	234,08	166,72	62,87	53,03	73,13	90,13	35,39	9,66	6,22	12,43	21,41	-2,57
7,00	177,28	172,99	182,49	200,88	165,40	28,36	22,96	32,80	48,00	9,02	-13,01	-15,02	-11,02	-4,76	-21,45
8,00	180,43	176,92	185,04	197,42	166,78	28,65	24,46	33,64	47,41	9,55	-15,18	-16,96	-13,24	-8,36	-22,79
9,00	179,33	175,04	182,76	197,27	161,19	30,40	25,33	35,55	51,44	9,27	-11,63	-13,51	-9,73	-3,97	-18,92
10,00	194,08	190,55	197,51	208,19	174,81	30,68	25,09	36,69	53,51	12,80	-9,39	-10,87	-7,81	-2,21	-15,50
11,00	196,99	192,23	201,63	211,72	180,59	33,86	28,80	39,43	54,17	16,35	-9,46	-11,27	-7,35	0,01	-16,08
12,00	196,18	193,13	199,63	209,00	182,10	42,88	37,70	48,91	64,45	24,98	-8,76	-10,70	-6,62	-1,17	-15,39
13,00	197,38	194,94	199,92	208,73	187,82	38,08	33,28	43,71	59,74	20,52	-8,66	-10,38	-6,86	-1,13	-17,16
14,00	205,50	201,86	207,93	218,78	187,86	43,59	37,88	49,48	61,13	24,73	-6,51	-8,12	-4,57	1,68	-14,33

	<b>F [N]</b>	<b>K<sub>C</sub> [MPa]</b>					<b>P<sub>C</sub> [kW]</b>				
<i>T</i>	<i>MED.</i>	<i>MED.</i>	<i>Q1</i>	<i>Q3</i>	<i>MAX</i>	<i>MIN</i>	<i>MED.</i>	<i>Q1</i>	<i>Q3</i>	<i>MAX</i>	<i>MIN</i>
1,00	179,20	496,49	487,23	503,59	523,24	439,99	3,25	3,19	3,30	3,42	2,88
2,00	175,64	483,04	473,74	493,87	544,00	443,93	3,16	3,10	3,23	3,56	2,91
3,00	181,23	564,89	543,05	577,09	608,85	488,52	3,70	3,55	3,78	3,98	3,20
4,00	184,19	563,31	530,09	574,75	603,35	443,13	3,69	3,47	3,76	3,95	2,90
5,00	181,88	580,73	537,54	599,97	646,01	431,87	3,80	3,52	3,93	4,23	2,83
6,00	196,45	601,59	553,16	624,74	655,69	466,99	3,94	3,62	4,09	4,29	3,06
7,00	200,34	496,58	484,55	511,19	562,68	463,32	3,25	3,17	3,35	3,68	3,03
8,00	201,51	505,40	495,58	518,33	552,99	467,18	3,31	3,24	3,39	3,62	3,06
9,00	201,51	502,33	490,31	511,93	552,57	451,52	3,29	3,21	3,35	3,62	2,96
10,00	209,54	543,65	533,75	553,26	583,15	489,66	3,56	3,49	3,62	3,82	3,20
11,00	204,27	551,79	538,47	564,80	593,05	505,85	3,61	3,52	3,70	3,88	3,31
12,00	202,17	549,53	540,99	559,19	585,43	510,08	3,60	3,54	3,66	3,83	3,34
13,00	209,64	552,87	546,06	559,99	584,67	526,09	3,62	3,57	3,67	3,83	3,44
	219,56	575,63	565,42	582,44	612,82	526,21	3,77	3,70	3,81	4,01	3,44

**Tab. 8 Analýza řezivosti VBD s povlakem TripleAlwin – výchozí geometrie – doměřené hodnoty**

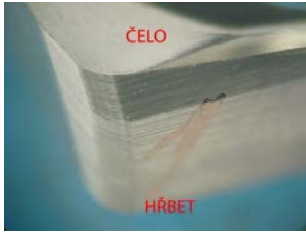

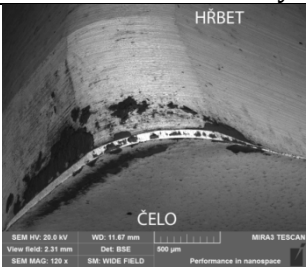
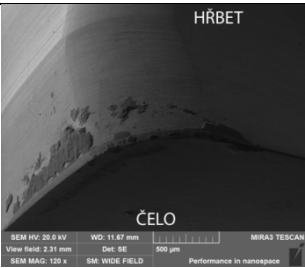
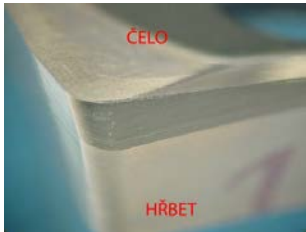
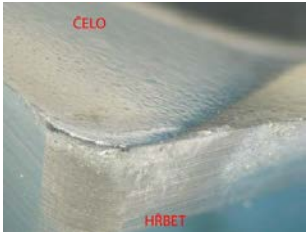
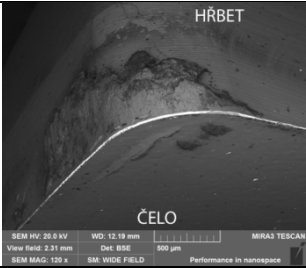
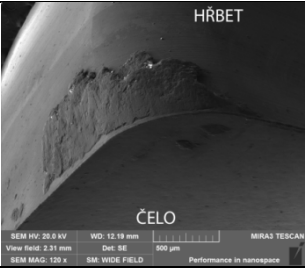
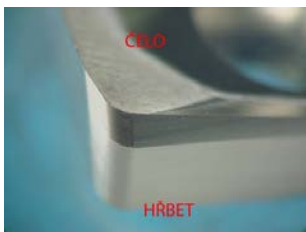
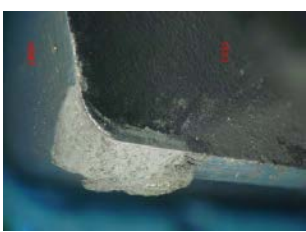
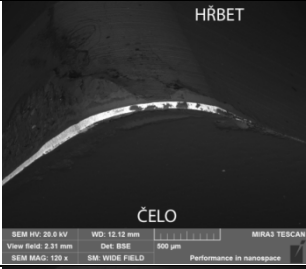
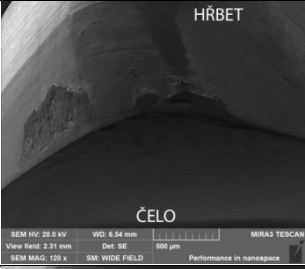
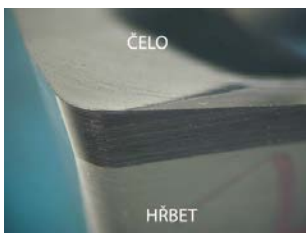
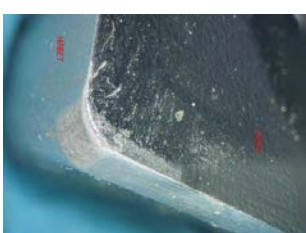
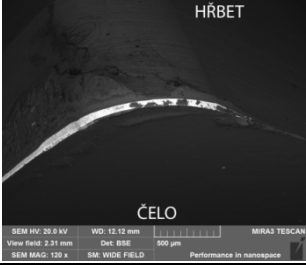
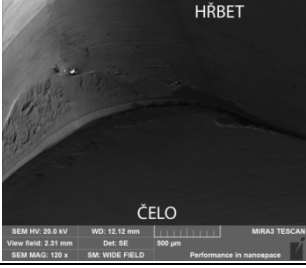
<i>T</i>	<b>F<sub>C</sub> [N]</b>					<b>F<sub>CN</sub> [N]</b>					<b>F<sub>P</sub> [N]</b>				
	<i>MED.</i>	<i>Q1</i>	<i>Q3</i>	<i>MAX</i>	<i>MIN</i>	<i>MED.</i>	<i>Q1</i>	<i>Q3</i>	<i>MAX</i>	<i>MIN</i>	<i>MED.</i>	<i>Q1</i>	<i>Q3</i>	<i>MAX</i>	<i>MIN</i>
1,00	177,29	172,77	182,26	190,20	151,03	29,27	23,46	34,59	50,48	7,83	-21,46	-24,31	-18,96	-13,19	-29,08
2,00	177,77	170,19	183,35	196,58	148,60	31,64	26,02	36,86	53,05	12,48	-15,34	-17,35	-13,15	-8,94	-22,97
3,00	180,00	173,25	184,76	202,23	147,13	34,87	28,00	43,36	63,40	14,57	-12,73	-15,02	-10,55	-3,44	-20,94
4,00	190,47	180,75	195,32	213,02	156,32	40,02	34,00	45,99	60,63	22,89	-7,25	-9,38	-4,93	0,10	-15,22
5,00	195,44	185,75	200,28	218,02	161,32	45,04	39,00	51,17	65,63	27,89	-12,26	-14,41	-9,94	-4,90	-20,22
6,00	200,12	186,76	206,53	217,05	157,53	48,04	40,25	53,98	73,38	24,37	-8,65	-10,72	-5,24	4,34	-15,18
7,00	208,60	195,68	213,61	224,67	160,03	49,61	40,56	60,25	77,12	25,17	-6,37	-8,32	-4,15	6,39	-13,57
8,00	200,33	187,97	207,89	223,43	156,35	54,26	45,27	63,49	81,24	30,55	-4,86	-7,02	-2,82	6,05	-13,38
9,00	199,95	186,12	208,88	231,82	157,98	51,68	42,12	63,49	84,43	27,70	-6,67	-8,42	-4,26	2,15	-14,18
10,00	216,37	211,25	220,87	236,09	202,36	62,97	57,21	71,18	90,65	43,23	-4,19	-6,08	-2,42	9,70	-11,29
11,00	209,34	203,89	217,20	232,64	195,40	57,78	52,29	62,54	80,08	42,24	-3,61	-5,39	-1,40	5,61	-9,25
12,00	202,92	198,20	211,49	229,90	185,77	54,79	48,57	62,24	80,73	33,92	-4,57	-6,65	-2,76	2,72	-11,27
13,00	213,28	207,84	218,63	229,73	192,31	60,04	55,08	66,30	83,76	43,19	-2,64	-4,32	-0,79	5,69	-9,65
14,00	210,21	203,74	216,44	233,87	183,15	55,79	51,65	61,45	77,74	40,44	-2,80	-4,96	-0,49	7,91	-12,60

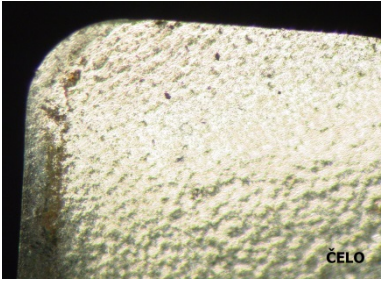


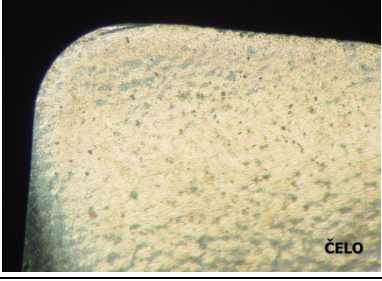
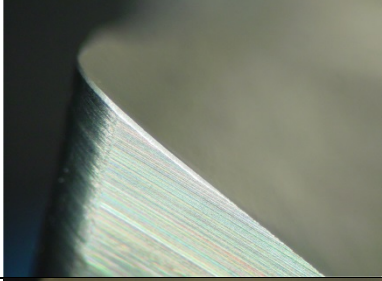

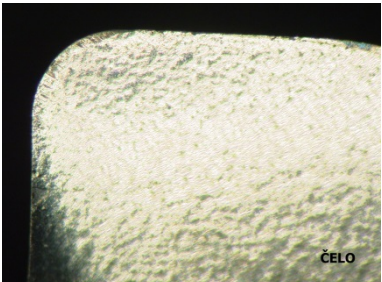

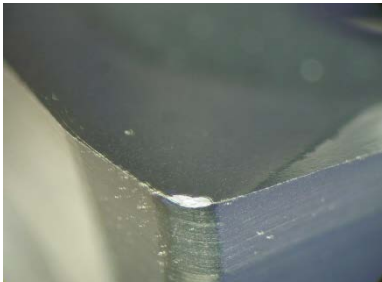
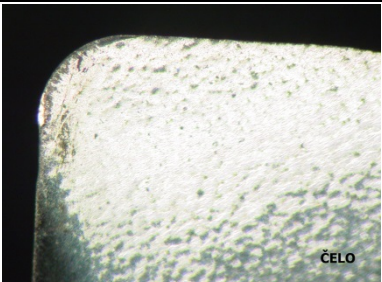
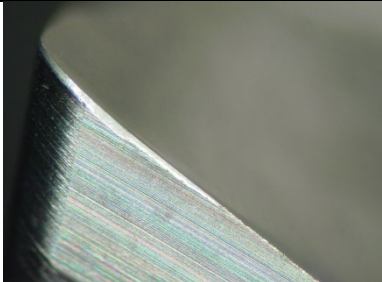

<i>T</i>	<b>K<sub>C</sub> [MPa]</b>					<b>P<sub>C</sub> [kW]</b>				
	<i>MED.</i>	<i>Q1</i>	<i>Q3</i>	<i>MAX</i>	<i>MIN</i>	<i>MED.</i>	<i>Q1</i>	<i>Q3</i>	<i>MAX</i>	<i>MIN</i>
1,00	496,62	483,95	510,54	532,76	423,04	3,25	3,17	3,34	3,49	2,77
2,00	497,95	476,72	513,58	550,64	416,25	3,26	3,12	3,36	3,60	2,72
3,00	504,19	485,29	517,54	566,46	412,13	3,30	3,18	3,39	3,71	2,70
4,00	533,54	506,30	547,12	596,69	437,86	3,49	3,31	3,58	3,91	2,87
5,00	547,46	520,31	561,01	610,69	451,87	3,58	3,41	3,67	4,00	2,96
6,00	560,55	523,13	578,52	607,99	441,27	3,67	3,42	3,79	3,98	2,89
7,00	584,31	548,12	598,34	629,32	448,27	3,82	3,59	3,92	4,12	2,93
8,00	561,15	526,52	582,34	625,86	437,95	3,67	3,45	3,81	4,10	2,87
9,00	560,08	521,35	585,09	649,36	442,52	3,67	3,41	3,83	4,25	2,90
10,00	606,07	591,74	618,68	661,32	566,85	3,97	3,87	4,05	4,33	3,71
11,00	586,39	571,13	608,39	651,64	547,35	3,84	3,74	3,98	4,27	3,58
12,00	568,41	555,19	592,42	643,97	520,35	3,72	3,63	3,88	4,21	3,41
13,00	597,43	582,18	612,41	643,50	538,68	3,91	3,81	4,01	4,21	3,53
14,00	588,83	570,69	606,29	655,11	513,04	3,85	3,74	3,97	4,29	3,36

# **PŘÍLOHA III**

**Změněná geometrie frézovací hlavy**

# Změněná geometrie

	SEM		TEM	
	Nová	Po řezných zkouškách	BSE	SE
			Po řezných zkouškách	
Bez povlaku				
Alu-Speed				
Darwin				
Tripple-Alwin				

	Plocha čela	Plocha hřbetní	Špička VBD
Nepovlak			
Aluspeed			
Darwin			
TrippleAlwin			

**Tab. 9 Analýza řezivosti VBD s povlakem AluSpeed – změněná geometrie**

	F <sub>c</sub> [N]					F <sub>cn</sub> [N]					F <sub>p</sub> [N]				
<i>T</i>	<i>MED.</i>	<i>Q1</i>	<i>Q3</i>	<i>MAX</i>	<i>MIN</i>	<i>MED.</i>	<i>Q1</i>	<i>Q3</i>	<i>MAX</i>	<i>MIN</i>	<i>MED.</i>	<i>Q1</i>	<i>Q3</i>	<i>MAX</i>	<i>MIN</i>
1,00	193,61	183,14	197,40	203,37	160,35	52,06	45,47	60,55	78,65	31,07	-24,24	-26,29	-21,29	-16,04	-30,12
2,00	197,23	190,87	202,64	210,91	169,38	44,41	40,82	48,50	57,43	29,25	-14,79	-16,33	-13,34	-8,09	-21,10
3,00	209,82	204,85	213,46	221,34	187,26	44,87	40,27	49,67	63,00	29,11	-17,42	-19,14	-15,91	-11,06	-22,83
4,00	215,43	211,52	220,35	233,59	195,84	53,52	49,47	57,08	67,09	36,97	-12,90	-14,30	-11,24	-6,66	-17,92
5,00	216,76	213,83	220,52	233,98	203,34	51,47	47,03	54,70	65,02	37,25	-12,40	-13,83	-10,82	-5,32	-17,19
6,00	217,94	214,46	221,97	235,34	205,41	69,08	64,99	72,94	82,44	54,76	-8,70	-9,93	-7,28	-3,12	-12,92
7,00	219,39	216,36	222,91	233,42	207,17	69,93	66,02	74,22	89,07	52,57	-5,04	-5,77	-4,32	-2,05	-8,85

	K <sub>c</sub> [MPa]					P <sub>c</sub> [kW]				
<i>T</i>	<i>MED.</i>	<i>Q1</i>	<i>Q3</i>	<i>MAX</i>	<i>MIN</i>	<i>MED.</i>	<i>Q1</i>	<i>Q3</i>	<i>MAX</i>	<i>MIN</i>
1,00	542,32	513,01	552,94	569,67	449,16	3,55	3,36	3,62	3,73	2,94
2,00	552,45	534,66	567,62	590,79	474,45	3,62	3,50	3,72	3,87	3,11
3,00	587,72	573,82	597,93	619,99	524,54	3,85	3,76	3,91	4,06	3,43
4,00	603,44	592,50	617,22	654,32	548,57	3,95	3,88	4,04	4,28	3,59
5,00	607,18	598,98	617,69	655,39	569,57	3,97	3,92	4,04	4,29	3,73
6,00	610,47	600,73	621,77	659,22	575,38	4,00	3,93	4,07	4,31	3,77
7,00	614,54	606,06	624,39	653,83	580,30	4,02	3,97	4,09	4,28	3,80

**Tab. 10 Analýza řezivosti VBD bez povlaku – změněná geometrie**

	F <sub>c</sub> [N]					F <sub>cn</sub> [N]					F <sub>p</sub> [N]				
<i>T</i>	<i>MED.</i>	<i>Q1</i>	<i>Q3</i>	<i>MAX</i>	<i>MIN</i>	<i>MED.</i>	<i>Q1</i>	<i>Q3</i>	<i>MAX</i>	<i>MIN</i>	<i>MED.</i>	<i>Q1</i>	<i>Q3</i>	<i>MAX</i>	<i>MIN</i>
1,00	196,51	190,61	200,56	208,90	172,70	42,80	37,59	47,06	58,33	21,35	-20,89	-22,22	-19,09	-14,56	-26,05
2,00	215,49	208,88	221,55	232,43	194,44	58,38	53,78	62,31	73,85	42,86	-16,06	-17,22	-14,61	-11,36	-20,29
3,00	212,26	207,72	217,40	232,04	196,70	56,32	52,96	60,26	68,57	40,57	-12,89	-14,15	-11,47	-7,65	-18,37
4,00	227,05	221,69	239,55	255,75	214,89	65,96	60,49	71,80	84,63	50,14	-12,57	-14,25	-10,87	-6,75	-18,30
5,00	219,25	215,05	222,45	232,24	207,16	70,18	65,51	75,11	88,19	57,44	-9,97	-10,98	-8,88	-5,35	-18,62
6,00	221,69	218,13	224,55	231,71	209,50	73,06	68,82	77,67	90,29	56,76	-8,43	-9,26	-7,55	-4,90	-11,23
7,00	229,64	226,44	232,03	239,50	220,23	75,30	69,94	79,64	90,79	57,04	-6,22	-6,98	-5,61	-3,61	-8,68

	K <sub>c</sub> [MPa]					P <sub>c</sub> [kW]				
<i>T</i>	<i>MED.</i>	<i>Q1</i>	<i>Q3</i>	<i>MAX</i>	<i>MIN</i>	<i>MED.</i>	<i>Q1</i>	<i>Q3</i>	<i>MAX</i>	<i>MIN</i>
1,00	550,45	533,93	561,78	585,15	483,75	3,60	3,49	3,68	3,83	3,17
2,00	603,60	585,10	620,60	651,06	544,65	3,95	3,83	4,06	4,26	3,56
3,00	594,57	581,85	608,96	649,97	550,98	3,89	3,81	3,99	4,25	3,61
4,00	635,98	620,98	670,99	716,39	601,93	4,16	4,06	4,39	4,69	3,94
5,00	614,15	602,39	623,11	650,53	580,28	4,02	3,94	4,08	4,26	3,80
6,00	620,98	611,00	628,99	649,05	586,83	4,06	4,00	4,12	4,25	3,84
7,00	643,25	634,27	649,93	670,87	616,89	4,21	4,15	4,25	4,39	4,04

**Tab. 11 Analýza řezivosti VBD s povlakem Darwin – změněná geometrie**

<i>T</i>	<b>F<sub>c</sub> [N]</b>					<b>F<sub>cn</sub> [N]</b>					<b>F<sub>p</sub> [N]</b>				
	<i>MED.</i>	<i>Q1</i>	<i>Q3</i>	<i>MAX</i>	<i>MIN</i>	<i>MED.</i>	<i>Q1</i>	<i>Q3</i>	<i>MAX</i>	<i>MIN</i>	<i>MED.</i>	<i>Q1</i>	<i>Q3</i>	<i>MAX</i>	<i>MIN</i>
1,00	194,14	189,41	197,82	212,13	161,87	48,86	44,67	53,46	64,82	34,48	-20,55	-22,47	-18,98	-12,85	-27,01
2,00	201,13	192,09	206,36	220,02	155,08	52,05	45,49	57,83	70,74	31,84	-17,65	-19,20	-15,78	-10,54	-24,54
3,00	213,42	198,37	222,65	239,50	162,97	57,66	50,05	66,43	81,14	34,76	-19,86	-21,14	-17,76	-10,70	-24,05
4,00	211,09	194,65	218,89	232,93	126,43	54,76	48,28	64,05	78,63	32,49	-19,45	-20,96	-17,13	-10,07	-23,92
5,00	197,10	181,82	211,63	227,95	144,53	67,91	55,25	78,59	97,91	39,00	-10,62	-12,03	-8,87	-2,89	-15,76
6,00	208,77	195,12	215,18	226,46	162,43	62,30	54,34	69,53	78,54	39,81	-9,43	-10,74	-7,74	-3,83	-15,32
7,00	215,53	203,07	220,89	235,12	174,13	69,73	63,07	77,71	94,22	46,06	-7,86	-9,03	-6,90	-4,23	-12,44

<i>T</i>	<b>K<sub>c</sub> [MPa]</b>					<b>P<sub>c</sub> [kW]</b>				
	<i>MED.</i>	<i>Q1</i>	<i>Q3</i>	<i>MAX</i>	<i>MIN</i>	<i>MED.</i>	<i>Q1</i>	<i>Q3</i>	<i>MAX</i>	<i>MIN</i>
1,00	543,80	530,57	554,11	594,19	453,40	3,56	3,47	3,63	3,89	2,97
2,00	563,38	538,05	578,05	616,29	434,38	3,69	3,52	3,78	4,03	2,84
3,00	597,80	555,67	623,67	670,86	456,49	3,91	3,64	4,08	4,39	2,99
4,00	591,28	545,23	613,12	652,47	354,15	3,87	3,57	4,01	4,27	2,32
5,00	552,09	509,31	592,79	638,52	404,85	3,61	3,33	3,88	4,18	2,65
6,00	584,80	546,56	602,74	634,33	455,00	3,83	3,58	3,94	4,15	2,98
7,00	603,73	568,82	618,75	658,59	487,75	3,95	3,72	4,05	4,31	3,19

**Tab. 12 Analýza řezivosti VBD s povlakem TripleAlwin – změněná geometrie**

<i>T</i>	<b>F<sub>c</sub> [N]</b>					<b>F<sub>cn</sub> [N]</b>					<b>F<sub>p</sub> [N]</b>				
	<i>MED.</i>	<i>Q1</i>	<i>Q3</i>	<i>MAX</i>	<i>MIN</i>	<i>MED.</i>	<i>Q1</i>	<i>Q3</i>	<i>MAX</i>	<i>MIN</i>	<i>MED.</i>	<i>Q1</i>	<i>Q3</i>	<i>MAX</i>	<i>MIN</i>
1,00	198,89	195,07	205,65	215,34	177,40	48,59	43,21	53,61	63,60	18,32	6,84	6,19	7,61	9,66	3,83
2,00	218,32	214,59	223,12	239,01	200,15	73,93	46,27	120,23	131,91	29,80	7,48	6,74	8,20	14,04	3,82
3,00	215,28	212,05	221,57	234,36	204,00	69,35	63,65	75,25	91,14	47,92	7,91	7,32	8,44	9,82	5,25
4,00	220,79	217,50	225,72	245,83	205,82	81,73	76,81	87,83	101,61	60,17	9,04	8,41	9,91	12,72	5,53
5,00	217,14	213,26	220,60	235,03	200,72	76,84	70,76	83,72	95,26	55,44	8,51	7,76	9,12	12,43	5,88
6,00	214,60	195,55	225,95	238,97	161,59	73,12	63,99	82,21	98,26	35,36	12,86	11,55	16,18	24,40	9,74
7,00	223,42	207,12	236,81	252,33	169,50	88,53	77,19	104,36	126,20	52,41	13,92	12,88	16,19	25,14	9,65

<i>T</i>	<b>K<sub>c</sub> [MPa]</b>					<b>P<sub>c</sub> [kW]</b>				
	<i>MED.</i>	<i>Q1</i>	<i>Q3</i>	<i>MAX</i>	<i>MIN</i>	<i>MED.</i>	<i>Q1</i>	<i>Q3</i>	<i>MAX</i>	<i>MIN</i>
1,00	557,11	546,41	576,05	603,20	496,92	3,65	3,58	3,77	3,95	3,25
2,00	611,53	601,09	624,99	669,51	560,64	4,00	3,93	4,09	4,38	3,67
3,00	603,02	593,97	620,63	656,47	571,41	3,95	3,89	4,06	4,30	3,74
4,00	618,45	609,24	632,28	688,61	576,53	4,05	3,99	4,14	4,51	3,77
5,00	608,23	597,38	617,93	658,36	562,24	3,98	3,91	4,04	4,31	3,68
6,00	601,12	547,77	632,92	669,38	452,64	3,93	3,59	4,14	4,38	2,96
7,00	625,84	580,18	663,33	706,80	474,79	4,10	3,80	4,34	4,63	3,11